УДК 531.383

Ф. И. Спиридонов, аспирант
E-mail: spiridonov.fedya@yandex.ru
Р. И. Мингазов, аспирант
E-mail: ramisjkee@gmail.com
К. В. Шишаков, д-р техн. наук, доц.
E-mail: shishakovkv@mail.ru
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Разработка программного комплекса для информационного сопровождения производства твердотельных волновых гироскопов

В работе представлено программное обеспечение, интегрирующее технологические процессы изготовления ТВГ в единую АСУТП. Рассмотрены задачи, возникающие при автоматизации процесса изготовления ТВГ. Для получения изделий и приборов, основанных на ТВГ с высокими характеристиками точности и надежности, требуется в процессе изготовления учитывать большое количество факторов, негативным образом влияющих на проведение технологических операций. Предложен программный комплекс по выявлению таких факторов, представленный в виде схемы программного продукта, модели данных, а также диаграммы потока данных.

Ключевые слова: твердотельный волновой гироскоп, АСУТП, балансировка, программное обеспечение, база данных.

Введение

Производство твердотельных волновых гироскопов (ТВГ) [4, 12, 13, 15, 17] состоит из множества сложных и наукоемких технологических процессов (ТП) [1, 3, 14, 17], интегрированных в единую АСУТП [2, 5]. Для повышения ее эффективности выполняется непрерывное развитие и усложнение программного комплекса, предназначенного для информационного сопровождения производства твердотельных волновых гироскопов. Выполненный в нем переход от «ручного способа» записи информации о проводимых ТП к единому цифровому хранилищу на основе построения разветвленных баз данных (БД) облегчает выявление факторов, негативным образом влияющих на качество произведенных изделий.

Точностные параметры ТВГ и навигационных комплексов на их основе являются важнейшими показателями качества. В то же время на

© Спиридонов Ф. И., Мингазов Р. И., Шишаков К. В., 2020

практике они зависят от большого количества разнообразных физических факторов и параметров. Эти вопросы широко обсуждаются научным сообществом, что отражается в регулярных публикациях на эту тему, в том числе в работах [6–10]. Тем не менее, они остаются открытыми, так как оказываются сильно зависящими от конкретных технологических решений. А предлагаемые функциональные зависимости, обоснованные теоретически, не всегда универсальны. Например, известно, что величина дрейфа сигнала ТВГ прямо пропорциональна разнодобротности и обратно пропорциональна добротности [2], но на практике данная теоретическая модель имеет корреляцию [3]. При этом многие технологические факторы в теоретических моделях явно не учитываются, а их влияние на показатели качества может быть описано только статистическими моделями. Среди таких показателей качества можно отметить факторы нестабильности дрейфа, нелинейности выходного сигнала, нестабильности нелинейности выходного сигнала, температурной нестабильности параметров, шумовой составляющей, ухудшения точности при вибрациях и ударах, времени наработки на отказ и многие другие [7, 8, 11, 16]. Анализ показывает, что факторы качества глубоко не изучены. Считается, что их выявление позволит определить оптимальные режимы процессов изготовления ТВГ. Повышение же эффективности производства в конечном итоге ведет к высвобождению производственных ресурсов и увеличивает экономическую выгоду за счет оптимизации процесса.

Область решаемых задач

Типовой процесс изготовления ТВГ состоит из следующих основных технологических этапов: шлифовка, полировка, отжиг, кислотное травление, промывка, балансировка, склейка, балансировка вклеенного резонатора, сварка [1, 3, 4, 17]. При этом весь цикл производства ТВГ включает более ста технологических операций, многие из которых являются многофакторными и уникальными. Например, качество проведения технологической операции «балансировка» ионно-плазменным травлением зависит от факторов: присутствие положительного заряда на поверхности стекла при ионной бомбардировке, снижающего эффективность распыления; точность определения дефекта и травление под углом 65–70°; присутствие конструктивной сложности оборудования, связанной с формированием ионного луча, распылением поверхности других деталей, удалением распыленных частиц из камеры и т.п. [3]. В свою очередь, для технологической операции балансировки ТВГ требуется оборудование, включающее в себя несколько сложных систем: вакуумную систему, систему охлаждения, систему ионно-плазменного

травления, измерительную систему, а также систему позиционного возбуждения. Так как все они оказывают значимое влияние на успешность проведения технологического процесса балансировки ТВГ, очень важно контролировать параметры всех этих систем.

Основной целью разработки и совершенствования (обновления) программного обеспечения является повышение качества всех этапов производства ТВГ. Для этого программный продукт должен решать множество задач – использоваться при управлении различными видами оборудования, при автоматизированном проведении технологических операций, при измерении параметров изделий ТВГ и т. п.. Все эти задачи удобно разделить на две большие группы – основные (задачи сопровождения производства) и дополняющие (исследовательские задачи).

К основным задачам относятся следующие: 1) управление ТП изготовления ТВГ; 2) управление производственным оборудованием для проведения ТП; 3) измерение параметров ТВГ; 4) сохранение результатов проведения ТП и др.

К дополняющим задачам относятся: 1) выявление факторов, негативным образом влияющих на проведение технологических операций (неполадки в оборудовании, износ оборудования, и т. п.) и точностные характеристики ТВГ при его изготовлении; 2) выявление способов: оптимизации технологических процессов; устранения факторов, влияющих негативным образом на проведение технологических операций (неполадки в оборудовании, износ) изготовления ТВГ; устранения факторов, влияющих негативным образом на точностные характеристики ТВГ при его изготовлении.

Модель программного комплекса

Для решения поставленных задач программный комплекс должен взаимодействовать с тремя основными объектами: оборудование, оператор и хранилище данных. Схема взаимодействия объектов с программным обеспечением представлена на рис. 1.

Взаимодействие программного обеспечения с оборудованием производится с помощью программных модулей, включающих в себя классы по отправке и приему данных по интерфейсам: COM, USB, Ethernet и другим с использованием протоколов обмена данными.

Взаимодействие программного продукта с оператором производится с помощью пользовательского интерфейса (UserInterface (UI)). В свою очередь, UI взаимодействует с программным модулем управления оборудованием.

С хранилищем данных программа взаимодействует с помощью программного модуля DataBase.

Рис. 1. Схема взаимодействия объектов с ПО

В задачи программного обеспечения входит множество параллельных процессов, таких как: контроль оборудования (т. е. постоянный опрос его состояния), проведение технологических операций, проведение вычислительных процедур, взаимодействие с оператором. Все эти задачи решаются путем построения программного обеспечения по многопоточной архитектуре, с использованием объектно ориентированного программирования. Схема программного обеспечения по решению вышеперечисленных задач представлена на рис. 2.

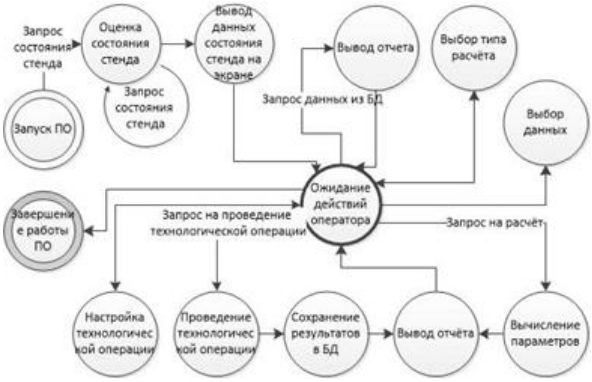

Рис. 2. Диаграмма состояния системы

Многопоточная архитектура [2] с использованием объектно-ориентированного программирования [5] позволяет осуществлять: постоянный контроль оборудования; проведение технологических операций параллель-

но контролю оборудования; сложные долгосрочные вычисления; работу по считыванию больших объемов данных, что не должно влиять на процесс контроля оборудования; работу с пользовательским интерфейсом; управление оборудованием; взаимодействие с хранилищем данных; настройку системы; автоматизацию технологических процессов.

Модель данных сопровождения производственного процесса

Любая технологическая операция при изготовлении ТВГ содержит следующие объекты: изделие, технологический процесс, технологическая операция, программа, оператор, производственное оборудование [1, 3].

Гироскопическое устройство на основе ТВГ состоит из компонентов: корпус, ТВГ, плата управления и интерфейса, акселерометры [7, 8]. В свою очередь, ТВГ состоит из корпуса, резонатора, основания, электродов, геттерного насоса, блока буферных усилителей [17].

На каждом этапе формирования структуры гироскопического устройства увеличивается количество составляющих изделия со своими технологическими процессами и набором технологических операций. Например, для получения ТВГ изначально требуется сформировать резонатор нужной формы, далее провести напыление, балансировку, сборку, произвести герметизацию, установить и настроить электронные компоненты. При этом технологические операции выполняются операторами на разном производственном оборудовании с соответствующим программным обеспечением.

Для хранения всего этого набора информации требуется единое хранилище данных или база данных, содержащая таблицы.

Таблицы базы данных

Наименование таблицы	Назначение
Ptoduct	Предназначена для хранения информации о изделиях
Type	Несет информацию о типах изделий
Link_Product	Хранит информацию о компонентой составляющей изделия
State_Product	Хранит информацию о состоянии изделия
States	Все возможные состояния изделий
Process	Набор технологических процессов
Instruction	Набор операций, включающий в себя (Process,Operation)
Operation	Набор операций, проводимых в тех. процессе
Oper_Product	Набор операций, проводимых над изделием
Programms	Набор программных продуктов со своей историей
Programm	Набор ПО, используемого для тех. операций
States_Programm	Набор состояний конкретного ПО
State_Programm	Набор возможных состояний ПО

Окончание таблицы

Наименование таблицы	Назначение
Users	Пользователи системы
Type_User	Набор типов пользователей
Stand	Набор стендов
Params_Stand	Параметры конкретных стендов
Param_Stand	Набор всевозможных параметров стендов
States_Stand	Состояния конкретных стендов
State_Stand	Набор возможных состояний стенда
Calc_Params	Вычисленный параметр в результате проведенной технологической операции
Calc_Param	Набор вычисляемых параметров
Formula	Набор формул, с помощью которых были произведены расчеты
FileData	Файл исходных данных, полученный в процессе проведения технологической операции

Такой способ хранения информации позволяет в дальнейшем решать задачи выявления и устранения неблагоприятных факторов, влияющих на качество производимых изделий.

Заключение

В статье рассмотрена предметная область производства ТВГ. Проанализированы возможные факторы, влияющие негативным образом на проведение технологических операций изготовления ТВГ. Предложен программный комплекс в виде моделей, представленный схемой «Взаимодействия объектов с ПО» и диаграммой «Состояние системы», также представлена модель данных сопровождения производства ТВГ. Программное обеспечение, построенное по данной модели, позволит производить исследования по выявлению факторов, требующих большого количества информации о проводимых технологических операциях и их режимах: на каком производственном оборудовании они проводились и в каких условиях. Программное обеспечение, которое позволяет осуществлять такого рода контроль, является хорошим инструментом для получения онтологической модели производства ТВГ, что в дальнейшем позволит получить наиболее качественную модель технологических процессов изготовления ТВГ.

Получив качественную модель, состоящую из технологических процессов изготовления ТВГ с учетом влияния негативных факторов, можно использовать при проектировании новой или оптимизации имеющейся технологии, при изменении ассортимента, когда необходимо эмпирически подбирать технологические параметры на промышленном

оборудовании. Это позволяет менять технологические режимы, минимизируя опытные дорогостоящие работы [5].

Список литературы

1. *Журавлев, В. Ф.* ВТГ: современное состояние, некоторые аспекты / В. Ф. Журавлев // Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем: процессы, модели, эксперимент. – 2011. – № 2 (33). – С. 118–123.

2. *Калабин, А. Л.* Программная система предпроектных исследований технологических процессов формирования химических волокон / А. Л. Калабин, А. В. Керницкий, Э. А. Пакшвер // Программные продукты и системы. – 2008. – № 1. – С. 16–19.

3. *Лунин, Б. С.* Волновой твердотельный гироскоп. Теория и технология : монография / Б. С. Лунин, В. А. Матвеев, М. А. Басараб. – Москва : Радиотехника, 2014. – 176 с.

4. Новое поколение ИНС на основе ВТГ / С. Негри, Э. Лабарр, К. Линьон, Э. Брунштейн, Э. Салаён // Гироскопия и навигация. – 2016. – Т. 24, № 1 (92). – С. 49–59. – DOI: 10.17285/0869-7035.2016.24.1.049-059.

5. *Тихомиров, В. А.* Системный подход к интеграции информационных ресурсов в концепции математического моделирования / В. А. Тихомиров, И. А. Карпов, Е. В. Тихомирова // Программные продукты и системы. – 2008. – № 1. – С. 4–7.

6. *Трутнев, Г. А.* Модель ТВГ в медленных переменных / Г. А. Трутнев // Вестник Удмуртского университета. Математика. Компьютерные науки. – 2015. Т. 25, № 3. – С. 421–429.

7. *Трутнев, Г. А.* Система съема и способы измерения колебаний резонатора твердотельного волнового гироскопа / Г. А. Трутнев, С. Б. Назаров, К. К. Перевозчиков // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2020. – № 1 (130). – С. 20–63. – DOI: 10.18698/0236-3933-2020-1-50-63.

8. Измерительно-вычислительный комплекс ТВГ / Г. А. Трутнев, С. Б. Назаров, К. К. Перевозчиков, А. В. Щенятский // Интеллектуальные системы в производстве. – 2017. – Т. 15, № 3. – С. 62–72. – DOI: 10.22213/2410-9304-2017-3-62-72.

9. *Beitia, J.* Low cost CVG for high-grade north finders and targeting systems / J. Beitia, C. Fell, I. Okon, P. Sweeney // 2014 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS) (16-17 Sept. 2014). Karlsruhe, Germany : IEEE, 2014. Pp. 1-15. DOI: 10.1109/InertialSensors.2014.7049408.

10. *Chikovani, V.* Self-compensation for disturbances in differential vibratory gyroscope for space navigation / V. Chikovani, O. Sushchenko // Hindawi. 2019. Article ID 5234061. Pp. 1–9. DOI: 10.1155/2019/5234061.

11. *Delhaye, F.* HRG by SAFRAN: The game-changing technology // 2018 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL) (26-29 Mar. 2018). Moltrasio, Italy : IEEE, 2018. Pp. 1–4. DOI: 10.1109/ISISS.2018.8358163.

12. *Jeanroy, A.* HRG by Sagem from laboratory to mass production / A. Jeanroy, G. Grosset, J.-C. Goudon, F. Delhaye // 2016 IEEE International Symposium on Iner-

tial Sensors and Systems (22-25 Feb. 2016). Laguna Beach, USA : IEEE, 2016. Pp. 1–4. DOI: 10.1109/ISISS.2016.7435530.

13. *El-Sheimy, N.* Inertial sensors technologies for navigation applications: state of the art and future trends / N. El-Sheimy, A. Youssef // Satellite Navigation. 2020. Vol. 1. No. 1. Article No. 2. DOI: 10.1186/s43020-019-0001-5.

14. *Qiu, B., Wang, J., Li, P.* Full digital control of hemispherical resonator gyro under force-to-rebalance mode // IEEE Sensors Journal. 2015. Vol. 15. No. 1. Pp. 71–75. DOI: 10.1109/JSEN.2014.2339229.

15. *Remillieux, G., Delhaye, F.* Sagem Coriolis Vibrating Gyros: A vision realized // 2014 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS) (16-17 Sept. 2014). Karlsruhe, Germany : IEEE, 2014. Pp. 1–13. DOI: 10.1109/InertialSensors.2014.7049409.

16. *Sedaghati, R.* Hemispherical vibratory gyroscope performance evaluation and sensitivity analysis with capacitive excitation / R. Sedaghati, M. Mahmoudian // Journal of Electrical and Computer Engineering Innovations (JECEI). 2019. Vol. 7. No. 1. Pp. 47-58. DOI: 10.22061/JECEI.2019.5565.239.

17. *Rozelle, D.* The hemispherical resonator gyro: from wineglass to the planets // Advances in the Astronautical Sciences. 2009. Vol. 134. Pp. 1157-1178. URL: https://www.researchgate.net/publication/279909300_The_Hemispherical_Resonator_Gyro_From_Wineglass_to_the_Planets

F. I. Spiridonov, postgraduate student
E-mail: spiridonov.fedya@yandex.ru
R. I. Mingazov, postgraduate student
E-mail: ramisjkee@gmail.com
K. V. Shishakov, DSc in engineering, associate professor
E-mail: shishakovkv@mail.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

Development of a Software Package for Information Support of Production of Solid-State Wave Gyroscopes

This paper presents software that integrates the manufacturing processes of TVG into a single automated control system. The problems that arise during the automation of the TVG manufacturing process are considered. To obtain products and devices based on TVG with high accuracy and reliability characteristics, it is necessary to take into account a large number of factors that negatively affect the conduct of technological operations in the manufacturing process. A software package for identifying such factors is proposed. It is presented in the form of a software product diagram, a data model, and a data flow diagram.

Keywords: solid-state wave gyroscope, automated control system, balancing, software, database.