

УДК 62-5: 007.52

Р.Р. Бакунов¹, В.Б. Бессонов², А.С. Мехоношин¹, Р.Т. Мурзакаев¹¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ РОБОТИЗИРОВАННОЙ УСТАНОВКИ¹

Производство объектов из полимерных композиционных материалов связано с необходимостью исследования внутренней структуры производимых изделий методами неразрушающего контроля, в том числе с использованием рентгеновского излучения. Чрезвычайно высокая важность рентгенографического исследования объясняется спецификой рассматриваемых объектов, производство которых осуществляется с помощью аддитивных технологий. Аддитивные технологии подразумевают послойное наращивание изделия. Таким образом, в его внутренней структуре могут образовываться такие дефекты, как расслоение, смоляные карманы и т.д. Зачастую эти дефекты обладают небольшими размерами, но могут представлять опасность в процессе эксплуатации. Самый перспективный путь автоматизации процесса рентгенографического исследования изделий из полимерных композиционных материалов – создание роботизированной установки, автоматически выполняющей комплекс взаимосвязанных операций по позиционированию источника и приемника рентгеновского излучения. Точность позиционирования подвижных элементов определяет минимальный размер дефектов, обнаруживаемых во внутренней структуре исследуемых объектов. Поэтому информационно-измерительная подсистема, предназначенная для контроля пространственной ориентации подвижных компонентов установки, является одним из ключевых функциональных блоков всей системы в целом. В данной статье рассматриваются проблемные вопросы построения информационно-измерительной подсистемы робототехнического комплекса. Описывается базовое математическое обеспечение, на котором основывается функционирование модулей инклинометров. Особое внимание уделяется тестированию аппаратного обеспечения, в ходе которого было исследовано влияние различных источников питания на стабильность показаний инклинометров. Результаты эксперимента приводятся в графическом и табличном виде. Статья может быть полезна разработчикам средств промышленной автоматизации. Кроме того, приведенная информация может использоваться инженерами и учеными при проектировании систем контроля и управления автономными аппаратами, так как для их успешного функционирования необходимо корректное и точное определение параметров пространственной ориентации.

Ключевые слова: промышленная робототехника, неразрушающий контроль, контроль ориентации, инклинометр, сенсорный модуль, источник питания.

¹ Работа выполнена в рамках гранта РФ № 16-19-00155 «Робототехническая система многокурсовой микрофокусной рентгенографии авиационных деталей и узлов из полимерных композиционных материалов при комплексном воздействии».

R.R. Bakunov¹, V.B. Bessonov², A.S. Mekhonoshin¹, R.T. Murzakaev¹

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

²Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI",
Saint Petersburg, Russian Federation

IMPLEMENTATION FEATURES OF INFORMATION-MEASURING SYSTEM OF ROBOTIC INSTALLATION

The production of objects made of polymer composite materials is associated with the need to research the internal structure of manufactured products using non-destructive control methods, including usage of X-rays. The extremely high importance of radiographic research is explained by the specifics of the considered objects which production is based on additive technologies. Additive technologies mean layer-by-layer build-up of the product. Thus, such defects as delamination, resin pockets, etc. can be formed in its internal structure. Often, these defects are small, but can be dangerous during exploitation. The most promising way of automation of the process of X-ray examination of products made of polymer composite materials is to create a robotic unit that automatically performs a set of interrelated operations of X-ray source and receiver positioning. The accuracy of positioning of moving elements determines the minimum size of defects that can be detected in the internal structure of the explored objects. Therefore, the information-measuring subsystem, which is designed for spatial orientation control of the mobile components of the installation, is one of the key functional blocks of the entire system. This article describes the problematic issues of constructing of the information-measuring subsystem of the robotic complex. The mathematical support which is the base for the operation of the inclinometer modules is described. Much attention is paid to hardware testing and investigation of the influence of various power sources on the stability of inclinometer measurement data. The results of the experiments are shown in graphical and tabular form. The article can be useful for developers in the sphere of industrial automation. In addition, the given information can be used by engineers and scientists for the design of control and management systems of unmanned units, because it is necessary to correctly and accurately determine the parameters of spatial orientation for successful functioning of such objects.

Keywords: industrial robotics, non-destructive testing, orientation control, inclinometer, sensor module, power supply.

Введение. В настоящее время чрезвычайно актуальной является задача автоматизации процесса рентгенографического исследования изделий из полимерных композиционных материалов [1]. Один из путей решения данной задачи – создание роботизированной установки, автоматически выполняющей комплекс взаимосвязанных операций по позиционированию источника и приемника рентгеновского излучения [2].

Рентгенографическое исследование необходимо для своевременного обнаружения дефектов во внутренней структуре изделий и может применяться при оценке качества и надежности выпускаемой продукции, а также при определении остаточного ресурса деталей, что является отдельной актуальной проблемой [3–5].

Функционирование установки должно происходить таким образом, чтобы полученная серия снимков позволяла провести компьютер-

ную реконструкцию исследуемого объекта и проанализировать мельчайшие дефекты в его внутренней структуре. Поэтому к точности позиционирования подвижных элементов системы предъявляются высокие требования, ведь именно от нее зависит минимальный размер дефектов, которые можно будет распознавать.

Таким образом, в состав роботизированной установки обязательно должны входить устройства контроля ориентации ее подвижных компонентов. Среди таких устройств находятся инклинометры – датчики, измеряющие абсолютный угол наклона (т.е. угол наклона относительно направления вектора ускорения свободного падения) [6].

Данная статья посвящена вопросам построения подсистемы контроля ориентации роботизированной системы. В частности, освещаются некоторые проблемные моменты, влияющие на точность углов, измеряемых инклинометрическими датчиками. Решение указанных проблем позволит достигать точности, декларируемой производителями сенсоров.

Основная часть. Структурная схема роботизированной установки [7] приведена на рис 1.

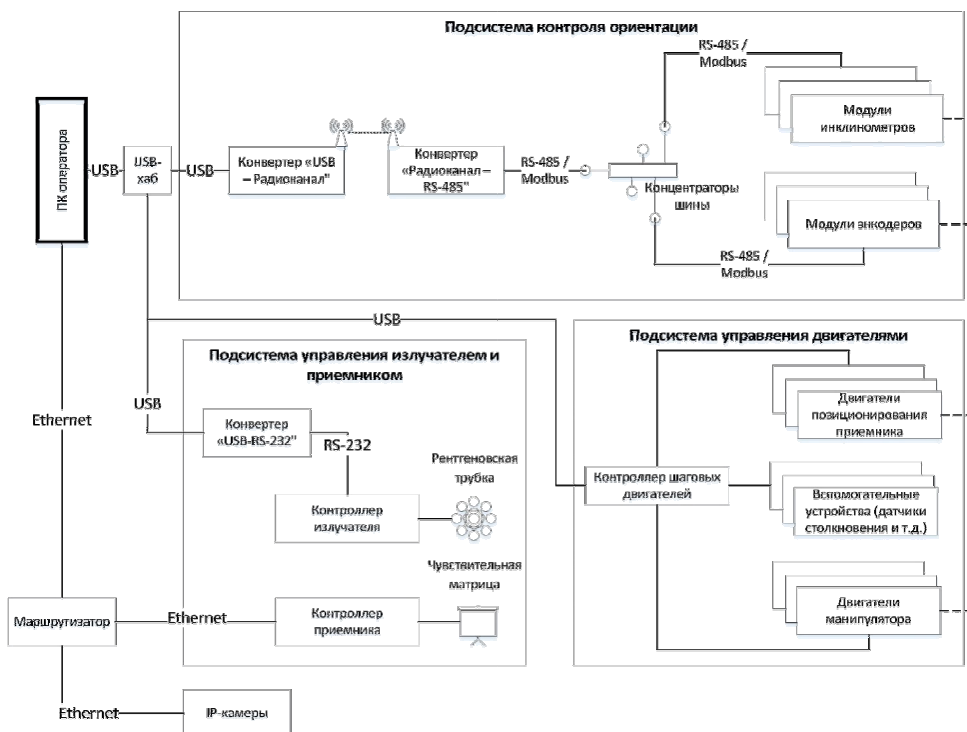


Рис. 1. Основные подсистемы робототехнической установки

Она представлена в виде различных функциональных блоков. Для данной статьи интерес представляет подсистема контроля ориентации, в состав которой входят датчики двух типов: инклинометры и энкодеры [8, 9]. Использование указанных сенсоров позволяет получить весь спектр данных, требующихся для контроля пространственной ориентации подвижных частей системы [10]. Детальное описание рассматриваемой подсистемы приводится ниже.

Конвертеры «USB – Радиоканал» и «Радиоканал – RS-485» – специальные устройства, играющие роль шлюзов и обеспечивающие прозрачный обмен данными между подсистемой контроля ориентации и персональным компьютером оператора через радиоканал [11, 12]. Применение указанных устройств позволит физически отключить компьютер оператора от шины RS-485, тем самым защищая его от возможных скачков напряжения на линиях связи. Указанные скачки могут возникать из-за наличия следующих факторов. Во-первых, предполагается, что линии передачи данных шины RS-485 имеют большую протяженность, так как оператор и установка должны обязательно находиться в разных помещениях (для защиты персонала от рентгеновского излучения). Во-вторых, часть шины RS-485 будет проходить вблизи источника сильного электромагнитного поля, генерируемого рентгеновским излучателем. Кроме того, использование радиоканала повышает удобство подключения системы к компьютеру оператора [13].

Концентраторы шины RS-485 предназначены для физического соединения устройств в системе с помощью шины RS-485. Кроме того, концентраторы обеспечивают питанием модули датчиков. К концентраторам подключается источник питания, преобразующий сетевое напряжение 220 В в постоянное напряжение, питающее сенсоры [14].

Модуль датчика – измерительное устройство, содержащее в своем составе сам датчик, управляющий микроконтроллер, интерфейсную схему, а также все необходимые дополнительные компоненты [15]. Согласно приведенной структурной схеме в состав системы можно включать различные сенсорные устройства, отличающиеся принципами функционирования и интерфейсами. Однако логика обмена данными с компьютером оператора в любом случае остается неизменной, так как вся непосредственная работа с датчиками выполняется управляющими микроконтроллерами в составе соответствующих модулей. Иными словами, со стороны хоста рассматриваемые модули представ-

ляют собой «черные ящики», для которых прописан единый порядок обмена данными, а детали их внутренней реализации не имеют значения. Используются два типа датчиков, позволяющих контролировать точность позиционирования компонентов системы, – инклинометры и энкодеры. Первый тип датчиков измеряет абсолютные углы наклона подвижных компонентов системы. Второй тип предназначен для контроля ориентации валов шаговых двигателей [10].

Далее в статье рассматриваются проблемные моменты, связанные с применением инклинометров, входящих в состав подсистемы контроля ориентации.

Использование одноосевых цифровых инклинометров, как правило, связано с необходимостью использования функции арксинуса при вычислении углов, как показано в формуле:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{D_{\text{out}} - \text{Offset}}{\text{Sens}}\right). \quad (1)$$

В указанной формуле используются следующие обозначения: D_{out} – текущее показание датчика; Offset – показание датчика, когда угол наклона составляет 0° ; Sens – чувствительность датчика.

Использование арксинуса при вычислении углов порождает проблему, связанную с падением разрешающей способности сенсора при увеличении величины наклона. Например, в случае использования прецизионного цифрового сенсора, производимого одной из японских компаний, указанную проблему можно проиллюстрировать (табл. 1).

Таблица 1

Падение разрешающей способности цифрового сенсора

Показания датчика (11-битные значения, $\text{Offset} = 1024$, $\text{Sens} = 819$)	Вычисленные углы (град)
1838	83,67
1839	84,34
1840	85,09
1841	85,99
1842	87,17
1843	90
1844	значение не может быть вычислено
...	значение не может быть вычислено

Очевидно, что при приближении угла наклона к 90° разница в градусах между соседними цифровыми показаниями датчика может становиться ощутимой. Таким образом, это негативным образом влияет на точность измерений, а следовательно, и на точность позиционирования компонентов роботизированной установки.

Следует отметить, что при углах наклона, близких к 0° , возможно избежать использование арксинуса, так как в этих областях выходной сигнал датчика достаточно легко поддается линейаризации. Однако такой подход неизбежно приводит к появлению ошибки, которая увеличивается с ростом угла наклона датчика, поэтому он не рекомендуется компаниями-производителями сенсоров.

Обозначенную проблему, связанную с использованием функции арксинуса, можно решить, производя одновременные измерения абсолютных углов наклона в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Таким образом, для этого требуется 2-осевой инклинометр [16]. В этом случае функцию арксинуса можно заменить на арктангенс, как показано в выражении:

$$\alpha = \operatorname{arctg}\left(\frac{x}{y}\right) = \operatorname{arctg}\left(\frac{\frac{DX_{\text{out}} - \text{Offset}}{\text{SensX}}}{\frac{DY_{\text{out}} - \text{Offset}}{\text{SensY}}}\right). \quad (2)$$

В данной формуле DX_{out} – показание сенсора по оси X , DY_{out} – показание по оси Y , SensX и SensY – значения чувствительности датчика по соответствующим осям. Если чувствительность датчиков одинакова для обеих осей, то формула для вычисления угла наклона упрощается:

$$\alpha = \operatorname{arctg}\left(\frac{DX_{\text{out}} - \text{Offset}}{DY_{\text{out}} - \text{Offset}}\right). \quad (3)$$

Таким образом, используя 2-осевой инклинометр вместо 1-осевого, можно существенно повысить точность измерений. Поэтому в качестве инклинометров для роботизированной системы были выбраны прецизионные 2-осевые сенсоры.

Экспериментальная часть. В процессе построения информационно-измерительной подсистемы роботизированной установки немаловажную роль играет выбор источника питания для сенсорных блоков [17]. Производителями инклинометров явно указывается в технической документации, что этот выбор влияет на итоговую точность измерений. В процессе поиска оптимального варианта по соотношению «доступность – обеспечиваемая точность» было прове-

дено экспериментальное тестирование нескольких источников постоянного напряжения 5 В:

- USB-порт персонального компьютера [18];
- DC-DC преобразователь на базе микросхемы E50P [19];
- промышленный блок питания фирмы Purelogic.

Схематично экспериментальная установка показана на рис. 2.

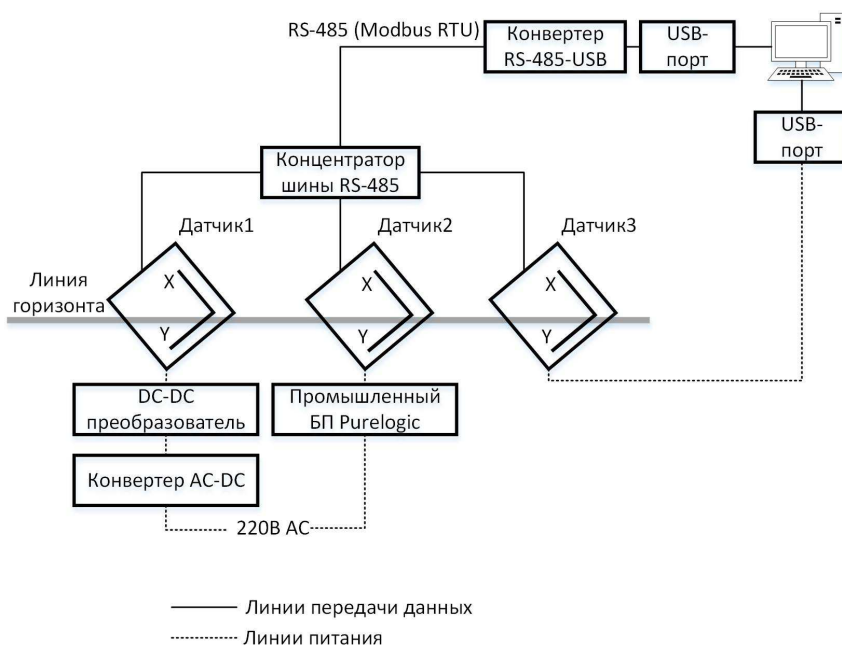


Рис. 2. Структурная схема экспериментальной установки

Сенсорные блоки (построенные на базе инклинометров) были закреплены с помощью специального приспособления и сохраняли свою неподвижность в процессе измерений. Следует отметить, что цель эксперимента – определить стабильность величин углов, измеряемых датчиками в состоянии покоя. В данном случае абсолютно соосное расположение датчиков не является обязательным требованием, так как интерес представляют не сами измеряемые значения, а их флуктуации (определяющиеся используемым источником питания) [20].

Также следует отметить, что в процессе эксперимента специально не использовались какие-либо алгоритмы сглаживания измеренных сигналов. Результаты эксперимента представлены в виде графиков (рис. 3–5), которые иллюстрируют флуктуации величин измеряемых углов (при нахождении датчиков в состоянии покоя).

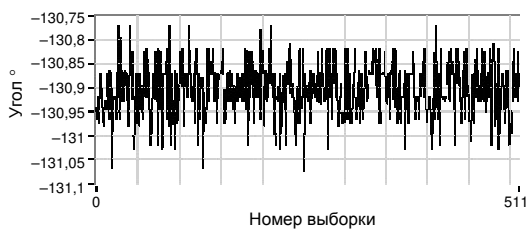


Рис. 3. Сигнал измеряемого угла (питание от USB-порта)

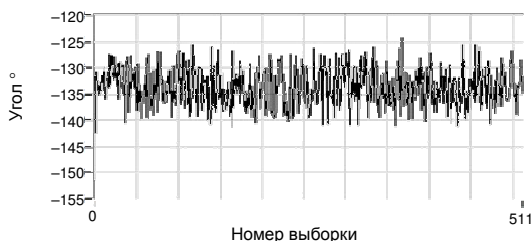


Рис. 4. Сигнал измеряемого угла (питание от DC-DC преобразователя)

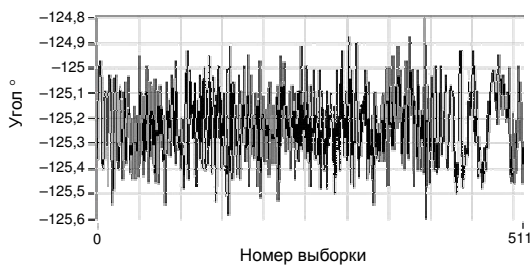


Рис. 5. Сигнал измеряемого угла (питание от промышленного блока питания)

Были также вычислены такие статистические характеристики измеряемых сигналов, как математическое ожидание и стандартное отклонение [21]. Результаты показаны в табл. 2.

Таблица 2

Вычисленные статистические характеристики

Источник питания	Математическое ожидание	Стандартное отклонение
USB-порт персонального компьютера	-130,90	0,06
DC-DC преобразователь	-133,65	3,73
Промышленный блок питания Purelogic	-125,23	0,15

Таким образом, можно сделать вывод, что наибольшую стабильность измеряемых величин обеспечивает питание от USB-порта. Однако использование промышленного блока питания также дает приемлемую устойчивость показаний. В конечном итоге применение техники сглаживания сигналов [22] позволит получить вполне достаточную стабильность измеряемых значений.

Выводы. В данной статье были рассмотрены некоторые вопросы построения информационно-измерительной подсистемы робототехнического комплекса, предназначенного для неразрушающего контроля объектов из полимерных композиционных материалов.

Была приведена структурная схема всей системы в целом; обозначены отдельные блоки, выполняющие роли функциональных подсистем. Показано место модулей инклинометров в составе подсистемы контроля ориентации роботизированных компонентов установки. Описано базовое математическое обеспечение, на котором основывается функционирование измерительных модулей. Особое внимание уделено тестированию аппаратного обеспечения, в ходе которого было исследовано влияние различных источников питания на стабильность показаний инклинометров. Результаты эксперимента приводятся в графическом и табличном виде.

Информация, приведенная в данной статье, может быть полезна в первую очередь широкому кругу разработчиков средств промышленной автоматизации. Кроме того, указанная информация может использоваться инженерами и учеными при проектировании систем контроля и управления беспилотными аппаратами, так как корректное определение параметров ориентации – ключевой фактор успешного функционирования данных объектов.

Библиографический список

1. Cubero S. Industrial Robotics: Theory, Modelling and Control. – Germany: Pro Literatur Verlag, 2006. – 964 p.

2. Роботизированная система для неразрушающей дефектоскопии объектов сложной формы / Р.А. Файзрахманов, Р.Т. Мурзакаев, Р.Р. Бакунов, А.С. Мехоношин // Электротехника. – 2016. – № 11. – С. 32–37.

3. Repair of damage in aircraft composite sound-absorbing panels / A.N. Anoshkin, V.Y. Zuiko, M.A. Tashkinov, V.V. Silberschmidt // Composite Structures. – 2015. – Vol. 120. – P. 153–166. DOI: 10.1016/j.compstruct.2014.10.001

4. Experimental-theoretical research of mechanical properties of perforated composite sandwich panels / A.N. Anoshkin, V.Yu. Zuiko, A.V. Tchugaynova, E.N. Shustova // *Solid State Phenomena*. – 2016. – Vol. 243. – P. 1–10. DOI:10.4028/www.scientific.net/SSP.243.1

5. Гончаровский О.В., Гончаровский Д.О. Тестирование встроенных систем // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. – 2011. – № 5. – С. 113–120.

6. Карпов В.А., Ростокина О.М., Карпов А.В. Анализ инструментальной погрешности двухосевого электролитического инклинометра // *Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого*. – 2017. – № 1. – С. 76–80.

7. Роботизированная система дефектоскопии деталей из полимерных композитных материалов / Р.А. Файзрахманов, Р.Т. Мурзакаев, Р.Р. Бакунов, А.С. Мехоношин // *Информационно-измерительные и управляющие системы*. – 2016. – Т. 14, № 9. – С. 12–16.

8. Бронштейн Я.И. Энкодеры и их интерфейсы // *Автоматизация в промышленности*. – 2008. – № 11. – С. 43–45.

9. Динамика гироскопического инклинометра / Я.И. Биндер, В.М. Мусалимов, П.А. Сергушин, Д.А. Соколов // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. – 2010. – № 2. – С. 7–10.

10. Будков С.А., Ларкин Е.В. Определение пространственного положения рабочего органа // *Известия ТГУ. Технические науки*. – 2013. – № 10. – С. 197–202.

11. Мараис Х., Сотников А. Руководство по реализации схем с интерфейсами RS-485/RS-422 // *Компоненты и технологии*. – 2011. – № 5. – С. 164–170.

12. Бакунов Р.Р., Файзрахманов Р.А., Мехоношин А.С. Разработка и реализация протокола обмена данными для локальной сети распределенных аппаратных модулей // *В мире научных открытий*. – 2015. – № 10.2(70). – С. 624–636.

13. Алабушев И.И., Зорин В.И., Шаляпин Д.В. Цифровой радиоканал передачи данных // *Автоматика, связь, информатика*. – 2007. – № 3. – С. 4–6.

14. Савиных М.А. Технологический USB-концентратор // *Приборы*. – 2016. – № 8. – С. 39–42.

15. Пьявченко О.Н. Интеллектуальные микропроцессорные модули сбора и обработки информации датчиков // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2010. – № 5. – С. 141–150.

16. Инклинометр микромеханический двухосевой ИМД-9 / С.А. Анчутин, Е.С. Морозова, А.С. Головань, В.Н. Максимов, В.Ф. Шилов // Датчики и системы. – 2011. – № 2. – С. 48–50.

17. Семьян А.П. 500 схем для радиолюбителей. Источники питания. – 3-е изд. доп. и перераб. – СПб.: Наука и техника, 2007. – 408 с.

18. Колкер А.Б., Горбунов Н.О. Управление исполнительными устройствами по USB в режиме реального времени // Автоматика и программная инженерия. – 2013. – № 2. – С. 48–59.

19. Робертс С., Рентюк В. Стабилизация напряжения: обратная связь в DC/DC-преобразователях // Силовая электроника. – 2017. – № 66. – С. 56–64.

20. Кудрявцев А. Сравнение оценок с ограниченной флуктуацией и оценок с наибольшей точностью в теории доверительного оценивания // Актуарий. – 2010. – № 1. – С. 48–52.

21. Старикова Л.Д. Применение математических методов в диссертационных исследованиях // Научные исследования в образовании. – 2012. – № 11. – С. 11–19.

22. Айфичер Э.С., Джервис Б.У. Цифровая обработка сигналов: практический подход. – 2-е изд. пер. с англ. – М.: Вильямс, 2004. – 992 с.

References

1. Cubero S. Industrial Robotics: Theory, Modelling and Control. Germany: Pro Literatur Verlag, 2006. 964 p.

2. Faizrakhmanov R.A., Murzakaev R.T., Bakunov R.R., Mekhonoshin A.S. Robotizirovannaiia sistema dlia nerazrushaiushchei defektoskopii ob"ektov slozhnoi formy [Robotic system for non-destructive testing complex shaped objects]. *Elektrotehnika*, 2016, no. 11, pp. 32-37.

3. Anoshkin A.N., Zuiko V.Y., Tashkinov M.A., Silberschmidt V.V. Repair of damage in aircraft composite sound-absorbing panels. *Composite Structures*, 2015, vol. 120, pp. 153-166. DOI:10.1016/j.compstruct.2014.10.001

4. Anoshkin A.N., Zuiko V.Yu., Tchugaynova A.V., Shustova E.N. Experimental-theoretical research of mechanical properties of perforated composite sandwich panels. *Solid State Phenomena*, 2016, vol. 243, pp. 1-10. DOI:10.4028/www.scientific.net/SSP.243.1

5. Goncharovskii O.V., Goncharovskii D.O. Testirovanie vstroennykh sistem [Testing of embedded systems]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2011, no. 5, pp. 113-120.

6. Karpov V.A., Rostokina O.M., Karpov A.V. Analiz instrumental'noi pogreshnosti dvukhosevogo elektroliticheskogo inklinometra [Analysis of instrumental error of biaxial electrolytic inclinometer]. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P.O. Sukhogo*, 2017, no. 1, pp. 76-80.

7. Faizrakhmanov R.A., Murzakaev R.T., Bakunov R.R., Mekhonoshin A.S. Robotizirovannaia sistema defektoskopii detalei iz polimernykh kompozitnykh materialov [Robotic flaw detection system for part of polymer composite materials]. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravliaiushchie sistemy*, 2016, vol. 14, no. 9, pp. 12-16.

8. Bronshtein Ia.I. Enkodery i ikh interfeisy [Encoders and their interfaces]. *Avtomatizatsiia v promyshlennosti*, 2008, no. 11, pp. 43-45.

9. Binder Ia.I., Musalimov V.M., Sergushin P.A., Sokolov D.A. Dinamika giroskopicheskogo inklinometra [Dynamics of gyroscopic inclinometer]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie*, 2010, no. 2, pp. 7-10.

10. Budkov S.A., Larkin E.V. Opredelenie prostranstvennogo polozheniia rabocheho organa [Determination of the spatial position of the working body]. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2013, no. 10, pp. 197-202.

11. Marais Kh., Sotnikov A. Rukovodstvo po realizatsii skhem s interfeisami Rs-485/Rs-422 [Guidelines for the implementation of schemes with RS-485/RS-422 interfaces]. *Komponenty i tekhnologii*, 2011, no. 5, pp. 164-170.

12. Bakunov R.R., Faizrakhmanov R.A., Mekhonoshin A.S. Razrabotka i realizatsiia protokola obmena dannymi dlia lokal'noi seti raspredelennykh apparatnykh modulei [Development and implementation of the data exchange protocol for the local network of distributed hardware modules]. *V mire nauchnykh otkrytii*, 2015, no. 10.2(70), pp. 624-636.

13. Alabushev I.I., Zorin V.I., Shaliapin D.V. Tsifrovoy radiokanal peredachi dannykh [Digital radio data transmission channel]. *Avtomatika, sviaz', informatika*, 2007, no. 3, pp. 4-6.

14. Savinykh M.A. Tekhnologicheskii USB-kontsentrator [USB technology hub]. *Pribory*, 2016, no. 8, pp. 39-42.

15. P'iyachenko O.N. Intel'ektual'nye mikroprotsessornye moduli sbora i obrabotki informatsii datchikov [Intelligent microprocessor modules for sensor data acquisition and processing]. *Izvestiia Iuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2010, no. 5, pp. 141-150.

16. Anchutin S.A., Morozova E.S., Golovan' A.S., Maksimov V.N., Shilov V.F. Inklinometr mikromekhanicheskii dvukhosevoi IMD-9 [Dual-axis MEMS inclinometer IMD-9]. *Datchiki i sistemy*, 2011, no. 2, pp. 48-50.

17. Sem'ian A.P. 500 skhem dlia radioliubitelei. Istochniki pitaniia [500 schemes for radio amateurs. Power sources]. 3rd ed. Saint Petersburg: Nauka i tekhnika, 2007. 408 p.

18. Kolker A.B., Gorbunov N.O. Upravlenie ispolnitel'nymi ustroistvami po USB v rezhime real'nogo vremeni [Control of executive devices via USB in real-time]. *Avtomatika i programmaia inzheneriia*, 2013, no. 2, pp. 48-59.

19. Roberts S., Rentiuk V. Stabilizatsiia napriazheniia: obratnaia sviaz' v DC/DC-preobrazovateliakh [Voltage regulation: inverse relationship in DC/DC converters]. *Silovaia elektronika*, 2017, no. 66, pp. 56-64.

20. Kudriavtsev A. Sravnenie otsenok s ogranichennoi fluktuatsiei i otsenok s naibol'shei tochnost'iu v teorii doveritel'nogo otsenivaniia [Comparison of estimates with limited fluctuation and estimates with the highest accuracy in the theory of confidence estimation]. *Aktuarii*, 2010, no. 1, pp. 48-52.

21. Starikova L.D. Primenenie matematicheskikh metodov v dissertatsionnykh issledovaniakh [Application of mathematical methods in dissertation research]. *Nauchnye issledovaniia v obrazovanii*, 2012, no. 11, pp. 11-19.

22. Aificher E.S., Dzhervis B.U. Tsifrovaia obrabotka signalov: prakticheskii podkhod [Digital signal processing: a practical approach]. 2nd ed. Moscow: Vil'iams, 2004. 992 p.

Сведения об авторах

Бакунов Роман Раисович (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры «Информационные технологии и автоматизированные системы» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский проспект, 29, e-mail: bakunov_roman@mail.ru).

Бессонов Виктор Борисович (Санкт-Петербург, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные приборы и устройства» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, e-mail: vbbessonov@yandex.ru).

Мехоношин Антон Сергеевич (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры «Информационные технологии и автоматизированные системы» Пермского национального исследовательского политехнического университета, (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: akropag@mail.ru).

Мурзакаев Рустам Талгатович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные технологии и автоматизированные системы» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: rustmur@gmail.ru).

About the authors

Bakunov Roman Raisovich (Perm, Russian Federation) is a Senior Lecturer of the Information technologies and automated systems Department of Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: bakunov_roman@mail.ru).

Bessonov Viktor Borisovich (Saint Petersburg, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of the electronic devices Department of Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI” (197376, Saint Petersburg, str. Professora Popova 5, e-mail: vbbessonov@yandex.ru).

Mekhonoshin Anton Sergeevich (Perm, Russian Federation) is a Senior Lecturer of the Information technologies and automated systems Department of Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: akropag@mail.ru).

Murzakaev Rustam Talgatovich (Perm, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Information technologies and automated systems Department of Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: rustmur@gmail.ru).

Получено 08.10.2018