

Куркова Ольга Петровна,
доктор технических наук, профессор,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения,
г. Санкт-Петербург

АППАРАТНО-ПРОГРАММНАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ И ИССЛЕДОВАНИЙ ВСТРАИВАЕМЫХ КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Аннотация: Представлены результаты разработки универсальной аппаратно-программной платформы для исследований и отладки встраиваемых интеллектуальных киберфизических подсистем в лабораторных условиях. Показаны возможность и целесообразность построения архитектуры платформы на базе ПЛИС FPGA. Представлены результаты тестирования функциональных возможностей платформы.

Ключевые слова: киберфизическая система, программно-аппаратная платформа, программируемая логическая интегральная схема, сенсорная компонента, протокол связи, управляющий компьютер, человеко-машинный интерфейс

Введение

Термин «киберфизические системы» («Cyber-Physical Systems» – CPS) был официально введен в 2015 г. Национальным институтом стандартов и технологий США (National Institute of Standards and Technology – NIST), предложившим концепцию «Интеллектуальные киберфизические системы» (ICPS), подразумевающую умные системы, которые включают интерактивные инженерные сети из физических и коммуникационных компонент [1]. На сегодня ICPS – это передавая технология, объединяющая физический и цифровой миры за счет использования датчиков, исполнительных механизмов и интеллектуального программного обеспечения, являющаяся «катализатором» развития интеллектуального и автономного транспорта и систем автоматического управления различных комплексов промышленного назначения [2, 3]. Данные системы должны обладать не только достаточной точностью и надежностью, но и киберзащищенностью. Создание и внедрение ICPS должны обеспечивать повышение уровня автоматизации и эффективности управления различными техническими системами, способствовать повышению безопасности их эксплуатации и адаптивности к внешней среде. Уже имеющийся опыт создания ICPS показал необходимость наличия универсального инструмента для их разработки и исследований с использованием приемов моделирования, аналогично, как и для исследований и разработки непосредственно самих технологических процессов и обеспечивающего их оборудования. При этом, например, Международным компьютерным институтом Эгейского университета (Турция) при поддержке Специального исследовательского фонда (Bijzonder Onderzoeksfonds – BOF) правительства Фламандии (Бельгия) был проведен общий анализ существующих на сегодня инженерных инструментов и языков, используемых для создания транспортных ICPS [4].

Данный анализ показал, что большинство платформ требуют большого начального периода обучения, характеризуются недостаточными возможностями по производительности, что затрудняет их использование для создания прототипов современных алгоритмов и ICPS, и, как правило, фокусируясь на одном каком-либо аспекте ICPS, не позволяют осуществлять исследования всех элементов, составляющих ICPS. На основании изложенных выше



аргументов, можно сделать вывод, что проблема создания универсальной аппаратно-программной платформы для виртуального моделирования ICPS, решению которой посвящена настоящая статья, является весьма актуальной.

Архитектура построения аппаратно-программной платформы

Целью работы, результаты которой представлены в настоящей статье, являлось создание универсальной аппаратно-программной платформы (АПП) как инструмента для разработки и исследований в лабораторных условиях встраиваемых ICPS. При этом дополнительно была поставлена задача максимального использования для достижения цели общедоступных готовых коммерческих компонентов.

Методика проектирования встраиваемых ICPS всегда основывается на принципе совместного проектирования аппаратного и программного обеспечения, когда оба компонента должны обеспечить интеграцию в единый продукт – единую киберфизическую систему. Этот же принцип был использован и при разработке платформы.

Исходя из поставленной задачи, при создании АПП предполагалось, что она должна удовлетворять следующим основным требованиям. Платформа должна представлять собой универсальный инструмент, позволяющий осуществлять исследования различных элементов ICPS, поддерживая интеграцию и обеспечивая совместимость с множеством разновидовых датчиков, человеко-машинных интерфейсов и каналов передачи данных/коммуникаций встраиваемой ICPS. Платформа должна обеспечивать возможность взаимодействия нескольких встраиваемых агентов с управляющим компьютером, чтобы обеспечивать возможность создания высокоуровневых сетей сбора, обработки и отображения данных, должна позволять реализовывать стандартные и интеллектуальные алгоритмы как на встроенном, так и на сетевом уровнях. Создаваемый инструмент должен быть настраиваемым, обладать определенной гибкостью и возможностью обновления и масштабирования. При этом инструмент должен быть довольно-таки простым для применения, доступным как для опытных, так и для начинающих пользователей.

Анализ определенных выше требований позволил сделать вывод о целесообразности принятия концепции построения аппаратной составляющей платформы на базе перепрограммируемой ПЛИС FPGA, подключаемой к управляющему компьютеру для обеспечения сетевых операций и поддержки мультиагентных алгоритмов. Существующий опыт показывает, что использование ПЛИС FPGA практически всегда позволяет обеспечить более простой цикл проектирования, облегчает процесс создания прототипов при разработке и тестирования новых решений, в том числе при создании ICPS. При этом система на базе ПЛИС FPGA позволяет интегрировать различные аспекты ICPS, обеспечив возможность сопряжения системы с различными готовыми коммерческими компонентами (различными датчиками и модулями), реконфигурировать при необходимости аппаратное обеспечение. Использование программируемого ядра микроконтроллера с ограниченной памятью для запуска встроенного программного обеспечения позволяет пользователям осуществлять имитационное моделирование электронных средств, даже не знакомым со специальными языками, предназначенными для описания структуры и поведения электронных схем, например, HDL (hardware description language). Управляющий компьютер в данном случае может выступать в качестве интеллектуального координатора или сервера, обеспечивающего связь с несколькими встроенными агентами при реализации многоагентной ICPS. Управляющий компьютер может фиксировать, обрабатывать и отображать входящие данные, а также может передавать команды управления встроенному агенту.

Архитектуру построения и принцип функционирования платформы целесообразно демонстрировать и исследовать на примере прототипа с учетом выбранных сенсорных компонент.



Для создания и исследования прототипа создаваемой платформы было принято решение использовать отладочную плату Arty A7 от компании «Digilent Inc.». Плата Arty A7 сама является практически готовой к использованию платформой, построенной на основе программируемой вентильной матрицы ПЛИС Artix-7™ (FPGA) от компании «Xilinx Inc.». Данная плата имеет установленную ПЛИС XC7A35TICSG324-1L. Arty A7 вполне надежная и недорогая платформа разработки, которая может легко взаимодействовать с несколькими датчиками широкого спектра, исполнительными механизмами, системами памяти, приемопередатчиками и дисплеями через стандарт интерфейса периферийных модулей PMOD (peripheral module interface – PMOD). При этом компания «Digilent Inc.» предлагает хорошо документированные пакеты PMOD. Платформу Arty A7 можно легко адаптировать к различным требованиям ICPS без необходимости разрабатывать с нуля аппаратное обеспечение для конкретного приложения. При необходимости для реализации исследований дополнительно могут быть разработаны специальные платы расширения, способные взаимодействовать с платой ARTY A7. В ПЛИС FPGA ARTY A7 используется программный тридцатидвухразрядный софт-процессор MicroBlaze, имеющий 128 кбит блочной оперативной памяти BRAM (bipolar random access memory – BRAM) и включающий необходимые контроллеры прерываний, синхронизации и периферийных устройств в логике FPGA, что позволяет динамически синтезировать микроконтроллер и отображать его на настраиваемую логическую структуру FPGA. Кроме этого, ПЛИС FPGA имеет периферийный контроллер AXI, который используется в качестве интерфейса между ядром процессора и всеми IP-ядрами периферийных контроллеров, которые, в свою очередь, могут подключаться к внешним периферийным устройствам. Все ядра взаимосвязаны через протокол AXI (advanced extensible interface), являющийся частью архитектуры ARM (advanced microcontroller bus architecture – AMBA). Это дает возможность обеспечить гибкую и перенастраиваемую конструкцию, позволяющую осуществлять итеративную разработку и быстрое прототипирование ICPS. Пользователи могут легко изменять и перенастраивать аппаратное и микропрограммное обеспечение в соответствии с меняющимися требованиями и экспериментировать с различными подходами к проектированию, ускоряя цикл разработки. Алгоритмы взаимодействия с датчиками, модулями сбора данных, низкоуровневой обработки и передачи данных могут быть реализованы на программном софт-процессоре MicroBlaze с использованием языка программирования C/C++ и в среде Xilinx Vivado SDK. Однако при этом должны учитываться ограничения памяти процессора MicroBlaze. Передаваемые встроенной системой данные можно записывать и отображать в пользовательском приложении MATLAB на главном управляющем компьютере с последующей их постобработкой и анализом.

Важное значение при создании платформы для разработки и исследований ICPS имеет выбор протоколов связи. Большинство микросхем поддерживают протоколы последовательного периферийного интерфейса (SPI) и/или межинтегрированной схемы (I2C) для внутрисхемной связи, в то время как протоколы UART или Ethernet обычно используются для связи с внешними устройствами. Как правило, SPI поддерживает более быструю передачу данных, чем I2C, но требует большего количества подключений между периферийными устройствами. За счет недетерминированного поведения и более высокой сложности протокола Ethernet обеспечивает более высокую скорость передачи данных и лучшую помехозащищенность, чем UART. Целесообразность выбора того или иного протокола связи зависит от вида коммутируемого устройства, в частности сенсорной компоненты.

Так как изначально, исследования были ориентированы на создание бортовых встраиваемых ICPS для беспилотного транспорта, в частности беспилотных электрокаров, при



разработке прототипа в качестве основных сенсорных компонент, из множества фактически задействованных в процессе управления электрокаром в обеспечение требований точного позиционирования были выбраны: инерциальный измерительный модуль и датчик угла поворота вала электродвигателя [5 – 6]. При этом учитывалось, что именно инерциальные модули наряду с оптоэлектронными средствами в последнее время находят все большее применение в системах ориентации и навигации беспилотных транспортных средств [7]. В качестве имитаторов сенсорных компонент использовались плата инерциального навигационного модуля Digilent Pmod NAV и плата поворотного модуля Pmod ENC. Модуль Pmod NAV включает в себя комплекс измерительных устройств: трех-осевой акселерометр STMicroelectronics LSM9DS1 (диапазоны измерений $\pm 2 / \pm 4 / \pm 8 / \pm 16$ g), трех-осевой гироскоп (диапазоны измерений $\pm 245 / \pm 500 / \pm 2000$ угловых скоростей в секунду), трех-осевой магнитометр, цифровой пьезорезистивный датчик давления STMicroelectronics LPS25HB (диапазон измерений 260-1260 ГПа) и температурный датчик термокомпенсации, а также 12-контактный разъем PMOD с интерфейсом SPI. Использование Pmod NAV позволяет получать множество данных, связанных с ориентацией объекта, благодаря чему пользователь может определять его точное положение и направление движения. Модуль Pmod ENC включает датчик вращения вала со встроенной кнопкой переключения для обеспечения нескольких типов выходных сигналов, а также скользящий переключатель и шести-контактный порт PMOD с интерфейсом ввода/вывода общего назначения (general-purpose input/output – GPIO).

Таким образом, в процессе создания платформы для быстрой передачи данных от инерциального измерительного модуля целесообразно было использовать протокол связи SPI, контроль за данными датчика поворота можно было осуществлять с помощью набора контактов ввода-вывода общего назначения, а UART использовать для связи с главным компьютером. При этом всю систему можно легко контролировать с помощью виртуальных терминалов UART с открытым исходным кодом. В случае необходимости в дальнейшем при расширении платформы по отношению к прототипу можно включать контроллеры и для дополнительных протоколов связи.

Архитектура платформы (верхний уровень) представлена на рис. 1. Как видно из рис. 1, архитектура включает единый встроенный агент на базе ПЛИС FPGA, который может интегрироваться и взаимодействовать с человеко-машинными интерфейсами, дисплеями и датчиками. ПЛИС FPGA управляет светодиодным дисплеем и взаимодействует с инерциальным измерительным модулем и датчиком угла поворота.

Структурная схема аппаратной реализации прототипа представлены на рис. 2. На рис. 3 представлена блок-схема структуры алгоритма обработки данных, поступающих от модуля Pmod NAV. На рис. 4 представлена блок-схема алгоритма отображения данных в MATLAB.

Исследование функциональных возможностей АПП

Исследование функциональных возможностей и характеристик аппаратно-программной платформы осуществлялось путем тестирования прототипа. При этом основной целью исследований являлась проверка и демонстрация гибкости



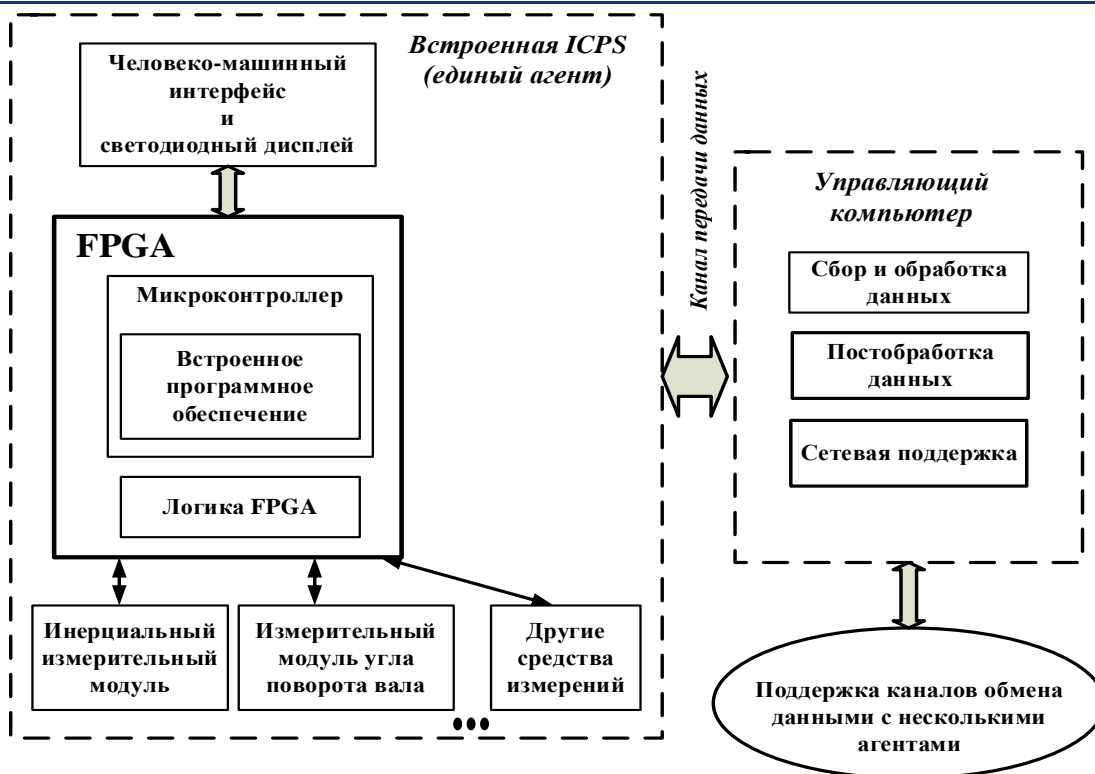


Рис. 1. Высокоуровневая архитектура платформы

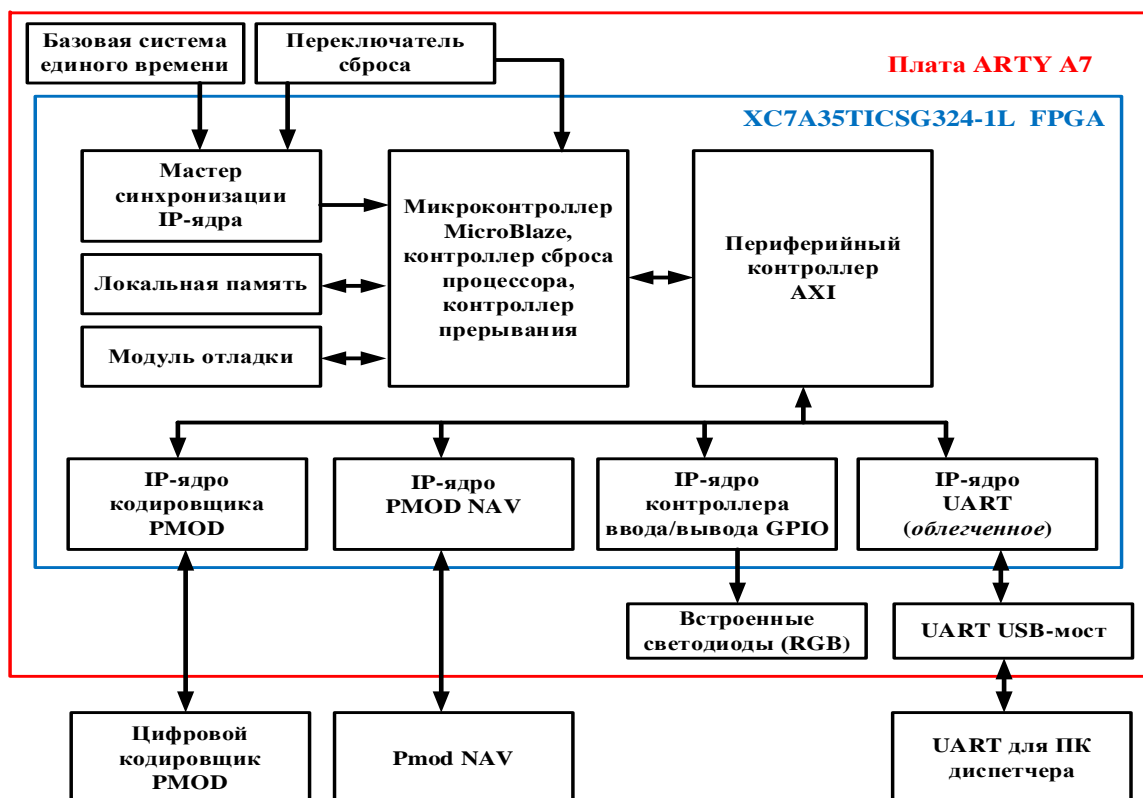


Рис. 2. Структурная схема прототипа





Рис. 3. Блок-схема структуры алгоритма обработки данных

и универсальности предлагаемой платформы для исследований ICPS. На рис. 5 представлена блок-схема принятой процедуры тестирования платформы.

На рис. 6 и рис. 7 представлены данные, характеризующие точность определения положения устройства платы в трехосной системе координат, полученные в результате измерений с использованием модуля Pmod NAV. Как видно из представленных графиков, расхождение данных о позиционировании объекта, полученных по средствам предлагаемой аппаратно-программной платформы (по данным с акселерометра инерциального модуля), и данных о истинном его положении составляет по оси X не более 20 мм, по оси Y не более 30 мм, а по оси Z не более 35 мм, что является вполне удовлетворительным результатом. Измерения изменений угловых положений (по данным с гироскопа инерциального модуля) при этом являются более точными.



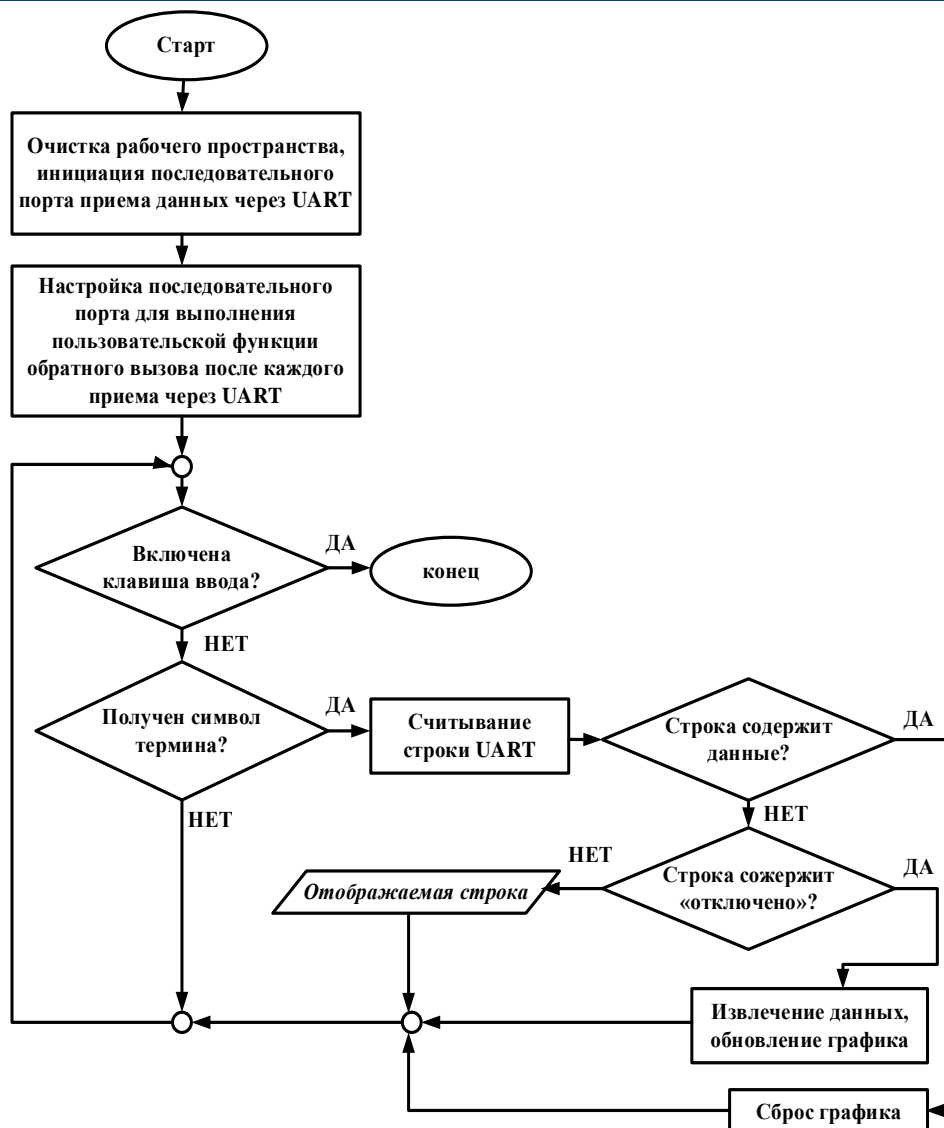


Рис. 4. Блок-схема алгоритма отображения данных в MATLAB

Выводы

В результате проведенных работ была создана интеллектуальная аппаратно-программная платформа для исследований и отладки в лабораторных условиях встраиваемых киберфизических подсистем. Платформа позволяет одновременно собирать, обрабатывать и анализировать данные разнородных сенсорных компонентов встраиваемых киберфизических подсистем, оперативно моделировать варианты результатов путем аппаратного варьирования исходными условиями, получая результаты с требуемой точностью для решения поставленных задач реализации процессов управления исполнительными компонентами технических систем. Достоверность выполнения платформой своих функций и оценки характеристик точности получения информационных данных при ее использовании подтверждены результатами тестирования прототипа.

Применение предлагаемой платформы позволит значительно сократить время проектирования и отработки при создании киберфизических систем, обеспечить более высокие их качество и надежность за счет повышения достоверности информации.



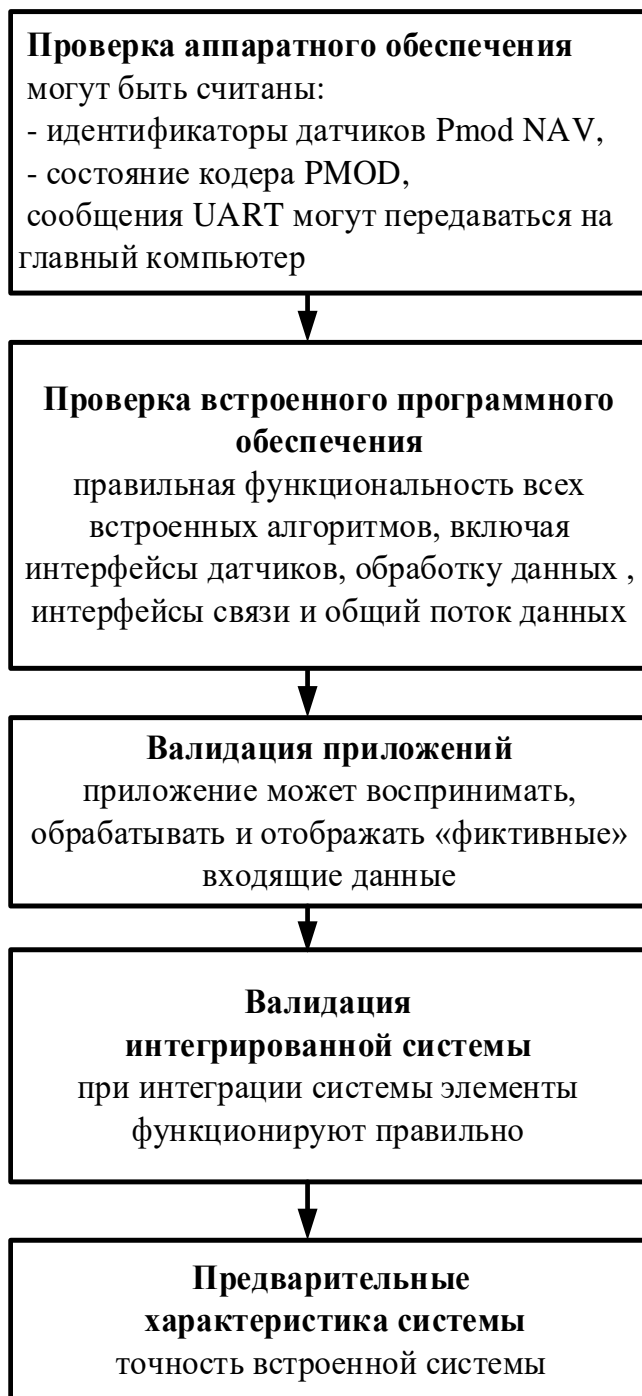


Рис. 5. Блок-схема процедуры тестирования



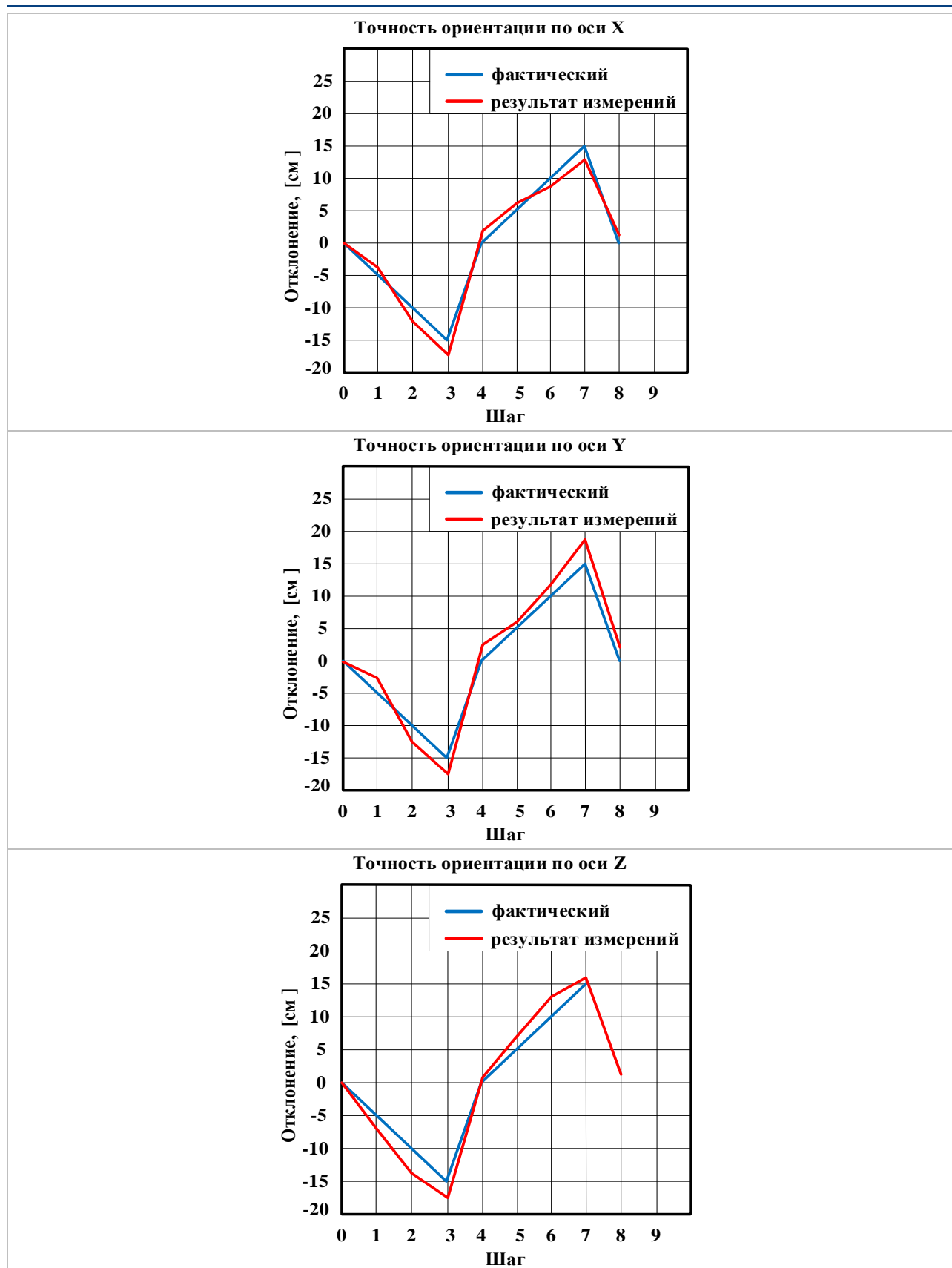


Рис. 6. Данные, характеризующие точность определения положения устройства платы в трехосной системе координат: линейная ориентация.



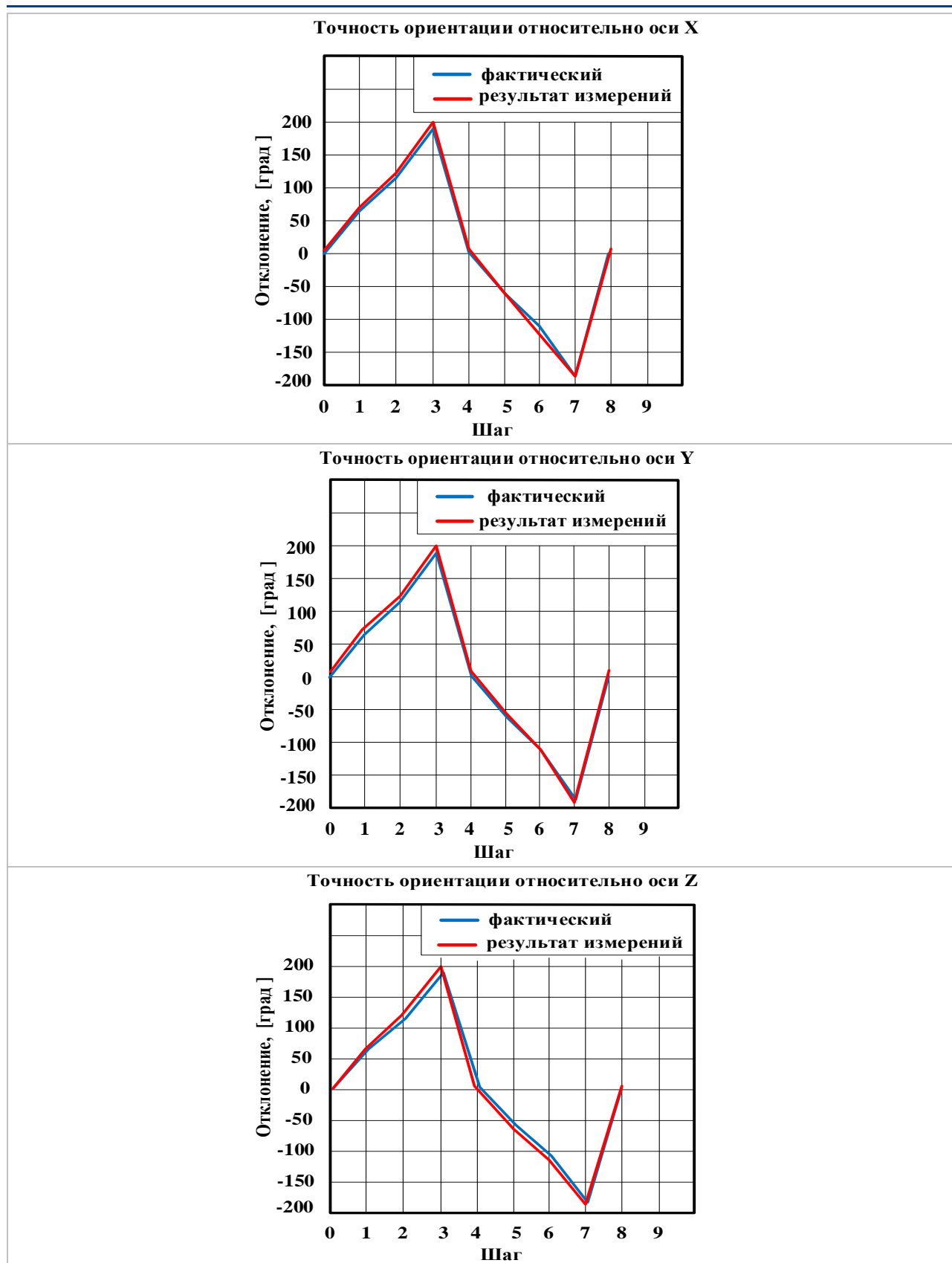


Рис. 7. Данные, характеризующие точность определения положения устройства платы в трехосной системе координат: угловая ориентация.



Успешно показав себя на примере прототипа с использованием инерциального модуля, платформа может использоваться в процессе разработки встраиваемых ICPS для систем ориентации и навигации беспилотного наземного, воздушного и морского транспорта, а также систем автоматического управления комплексов промышленного назначения. Кроме этого, платформа может использоваться в образовательном процессе при подготовке кадров по направлению «Киберфизические системы».

Список литературы:

1. CPS PWG Draft Framework for Cyber-Physical Systems Release 0.8 September 2015 // Официальный сайт National Institute of Standards and Technology [Электронный ресурс]. – URL:<https://pages.nist.gov/cpspwg/library/> (дата обращения 05.12.2024)
2. Дзюба Ю.В., Цветков В.Я., Козлов А.В. Киберфизические системы в управлении транспортом // Автоматика, связь, информатика. 2022. № 1. С. 10-12. DOI:10.34649/AT.2022.1.1.002.
3. Cartwright R. Cyber-physical challenges in transportation system design // Workshop Res. High-Confidence Transportation Cyber-Physical Syst.: Automotive, Aviation Rail. Washington, USA, November 2008 [Электронный ресурс]. – URL:<https://labs.ece.uw.edu/nsl/aar-cps/> (дата обращения 05.12.2024).
4. Mohamed M.A., Kardas G., Challenger M. Model-Driven Engineering Tools and Languages for Cyber-Physical Systems—A Systematic Literature Review // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 48605–48630.
5. Куркова О.П. Сетевая информационная модель коммуникационных связей между электромобилем и бесконтактным магнитно-резонансным зарядным устройством // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 3. С. 286-313. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-3-286-313 [Электронный ресурс]. – URL: <https://sccs.intelgr.com/archive/2022-03/10-Kurkova.pdf>.
6. Куркова О.П. Методика оценки совместимости бесконтактных зарядных устройств, поставляемых различными производителями для создания общественной инфраструктуры зарядки автономного электротранспорта // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 1. С. 104-125. DOI: 10.24411/2410-9916-2021-10105 [Электронный ресурс]. – URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2021-01/05-Kurkova.pdf>.
7. Официальный сайт ООО «Лаборатория Микроприборов» (Россия, Зеленоград) [Электронный ресурс]. – URL:<https://mp-lab.ru/products/ins-about/gkv-10/?ysclid=lv6yeugu2v616837823> (дата обращения 05.10.2024).

