



ПОВЫШЕНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМЫ ЗАХВАТА ДВИЖЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА ЗА СЧЁТ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РЕГИСТРАЦИИ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ОТ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Сарайкин А. И. ORCID ID 0009-0005-3954-8027

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Оренбургский государственный университет», Оренбург, Российская Федерация,
e-mail: saraikin-a@yandex.ru*

Системы захвата движения на базе микроэлектромеханических датчиков широко применяются в транспортной безопасности, виртуальной реальности, спортивной аналитике и биомеханике. Однако использование множества сенсоров генерирует большие объёмы данных, требующие обработки в реальном времени, а существующие коммерческие решения остаются дорогостоящими, что ограничивает их массовое применение. Цель исследования – повышение быстродействия системы регистрации параметров движения человека за счёт параллельной регистрации и обработки данных от микроэлектромеханических устройств при заданных стоимостных ограничениях. В статье представлена методика построения многомашинной архитектуры системы на базе двух параллельно работающих микроконтроллеров ATmega328P. Выполнено разделение исходного программного кода на две подпрограммы, каждая из которых обслуживает свою группу из 15 датчиков MPU-6050, подключённых через мультиплексоры TCA9548A. Проведён сравнительный анализ быстродействия и стоимости с исходной реализацией на одном микроконтроллере ATmega2560. Экспериментально подтверждено снижение среднего времени цикла обработки при сохранении стабильной частоты опроса 100 Гц. Достигнуто снижение себестоимости устройства в части затрат на микроконтроллеры и в общей структуре затрат. Предложенная методика может быть воспроизведена при создании аналогичных бюджетных систем, требующих обработки данных от множества датчиков в реальном времени.

Ключевые слова: захват движения, параллельная обработка, многомашинная система

ENHANCING THE PERFORMANCE OF A HUMAN MOTION CAPTURE SYSTEM THROUGH PARALLEL REGISTRATION AND PROCESSING OF DATA FROM MICRO-ELECTROMECHANICAL DEVICES

Saraykin A. I. ORCID ID 0009-0005-3954-8027

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
"Orenburg State University", Orenburg, Russian Federation,
e-mail: saraikin-a@yandex.ru*

Motion capture systems based on micro-electromechanical sensors are widely used in transportation safety, virtual reality, sports analytics, and biomechanics. However, the use of multiple sensors generates large volumes of data requiring real-time processing, while existing commercial solutions remain expensive, which limits their widespread application. The aim of this study is to improve the performance of a human motion parameter registration system through parallel registration and processing of data from micro-electromechanical devices under specified cost constraints. The article presents a methodology for constructing a multi-machine system architecture based on two ATmega328P microcontrollers operating in parallel. The original program code was divided into two subroutines, each serving its own group of 15 MPU-6050 sensors connected via TCA9548A multiplexers. A comparative analysis of performance and cost was conducted against the original implementation on a single ATmega2560 microcontroller. Experimental results confirmed a reduction in the average processing cycle time while maintaining a stable sampling frequency of 100 Hz. A reduction in device cost was achieved in microcontroller costs and in the total cost structure. The proposed methodology can be reproduced when developing similar low-cost systems requiring real-time data processing from multiple sensors.

Keywords: motion capture, parallel processing, multi-machine system

Введение

В настоящее время системы захвата движения находят применение в различных областях, таких как кинематография, спортивная аналитика, виртуальная реальность, робототехника и транспортные системы [1]. Использование множества инерциальных датчиков на одном объекте предъявляет

высокие требования к обработке данных в реальном времени. Особенно остро эта проблема стоит в системах контроля состояния водителя транспортных средств, где задержки в обработке информации могут повлиять на безопасность управления [2].

Разработке аппаратно-программных средств параллельной обработки данных

посвящены работы Владимирова С. С., Данилюка Е. И., Янковского А. А. и др. [3-5]. Алгоритмам для параллельных вычислений – работы Овчаренко О. И., Полякова В. С., Мунермана В. И. и др. [6-8]. Анализ патентной документации показывает устойчивый интерес к методам параллельной обработки данных. В патентах US10289447B1 и US11734009B2 [9; 10] предложен метод планирования параллельных задач, при котором данные разделяются на независимые пары и распределяются между потоками без конфликтов. Патент US11036471B2 [11] описывает методы группировки данных для эффективной параллельной обработки с использованием хеш-функций для равномерного распределения нагрузки. Наибольший интерес представляет патент US12149257B2 [12], в котором предложена схема обработки сенсорных данных с использованием параллельных цифровых фильтров, что позволяет уменьшить задержки и повысить производительность по сравнению с последовательной обработкой. В патенте US10672095B2 [13] описан метод увеличения пропускной способности за счёт параллельной передачи данных через несколько интерфейсов, что аналогично использованию в настоящей работе двух независимых UART-каналов. Среди компаний, занимающихся разработкой средств регистрации параметров движения человека, следует отметить Xsens (Нидерланды), Nansense (США), Rokoko (США). Данные коммерческие решения обеспечивают высокую точность, однако их стоимость варьируется от 300 тыс. до 2,5 млн руб., что делает их недоступными для массового применения в бюджетных проектах и специализированных научных исследованиях.

Анализ современных публикаций показал, что основным недостатком, сдерживающим массовое внедрение многопроцессорных вычислительных систем, является сложность адаптации алгоритмических и программных средств под конкретные задачи. Существующие однопроцессорные архитектуры, как правило, не справляются с нагрузкой при масштабировании количества датчиков, что приводит к потерям данных или снижению частоты опроса.

Цель исследования – повышение быстродействия системы регистрации параметров движения человека за счёт параллельной регистрации и обработки данных от микроэлектромеханических (MEMS) устройств при заданных стоимостных ограничениях (10–15 тыс. руб.).

В рамках исследования разработана методика построения системы захвата

движения на базе доступной элементной базы, позволяющая достичь требуемых характеристик быстродействия при жёстких стоимостных ограничениях. Основное внимание уделено практической реализации и экспериментальной верификации предложенной методики.

Материалы и методы исследования

Исходная система регистрации движений [2] включала 15 инерциальных датчиков MPU-6050. Каждый датчик имеет два встроенных адреса. Для расширения адресного пространства и сопряжения всех датчиков с микроконтроллером ATmega2560 использовался мультиплексор TCA9548A. Информация, поступающая в микроконтроллер с датчиков, обрабатывалась с помощью фильтра Калмана и затем передавалась на устройство сбора информации (рис. 1а). Основным недостатком данной архитектуры являлась последовательная обработка данных: центральный процессор последовательно опрашивал и обрабатывал показания каждого датчика. При частоте опроса 100 Гц это приводило к перегрузке вычислительных ресурсов и риску потери пакетов данных.

Предлагаемая архитектура с параллельной обработкой.

Для устранения узких мест предложена модернизация системы на базе многомашиной вычислительной системы (рис. 1б). В новой архитектуре используются два микроконтроллера ATmega328P, работающих параллельно и независимо друг от друга.

Принцип работы модернизированной системы:

1. Микроконтроллер 1 обслуживает первую группу датчиков (8 шт.) через свой мультиплексор.

2. Микроконтроллер 2 обслуживает вторую группу датчиков (7 шт.) через свой мультиплексор.

3. Оба микроконтроллера работают одновременно, выполняя идентичные алгоритмы: опрос датчиков, фильтрацию Калмана и подготовку данных.

4. Обработанная информация передается на устройство сбора по двум независимым каналам (UART).

Такая организация позволяет распределить вычислительную нагрузку и сократить время цикла обработки пропорционально количеству вычислителей.

Предлагаемая методика построения системы включает следующие этапы:

1. Разделение датчиков на группы по критерию минимизации времени опроса (равномерное распределение нагрузки).

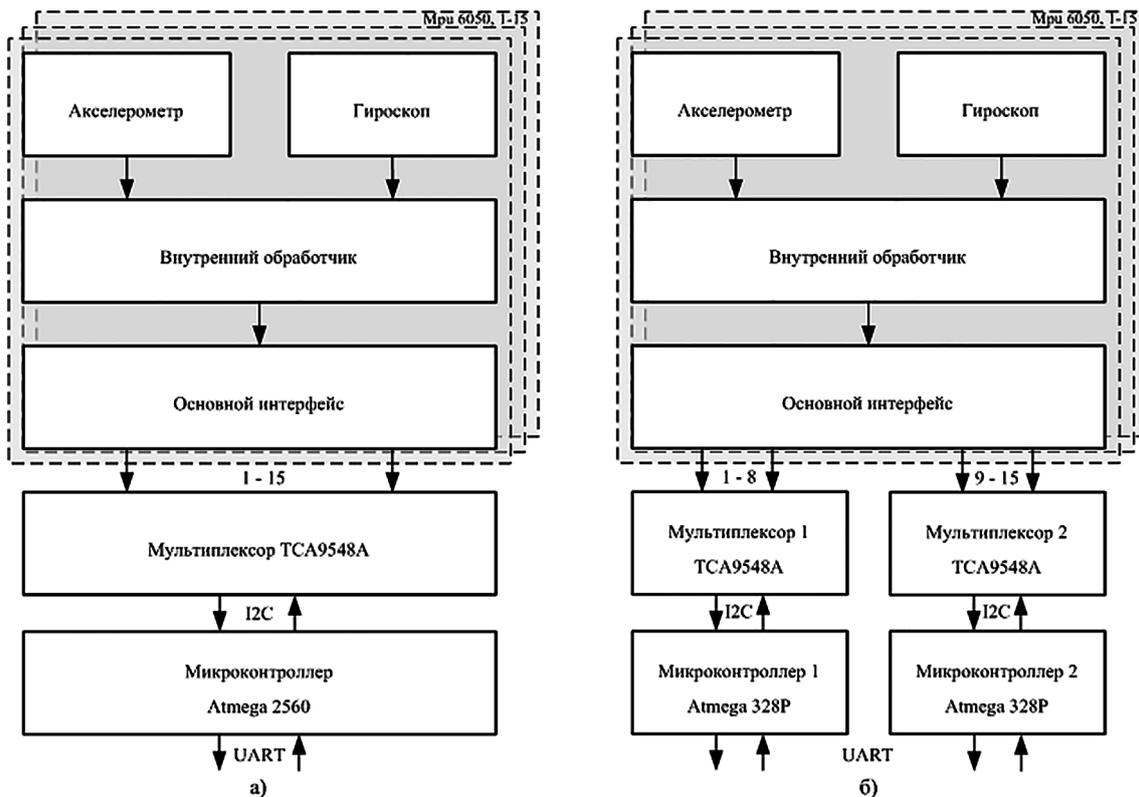


Рис. 1. Структурная схема системы регистрации движений:
 (а) исходная (однопроцессорная); (б) модернизированная (многомашинная)
 Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

Таблица 1

Основные технические характеристики микроконтроллеров

Наименование	Atmega 2560	Atmega 328P
Ядро	AVR	AVR
Разрядность, бит	8	8
Тактовая частота, МГц	16	16
Объём памяти, Flash, Кб	258,048	32,256
Объём памяти, RAM, Кб	8	2
Объём памяти, EEPROM, Кб	4	1
Портов ввода-вывода	54	23
Портов ввода-вывода с АЦП	16	6
Доля в себестоимости устройства, %	33,8	10

Источник: составлено авторами по результатам данного исследования.

2. Декомпозиция монолитного программного кода на функционально независимые подпрограммы с учётом ограничений по объёму памяти целевых микроконтроллеров.

3. Организация параллельной работы вычислителей с передачей данных по двум независимым UART-каналам.

Оригинальность предложенной методики состоит в возможности реализации параллельного опроса 15 MEMS-датчиков

на бюджетной элементной базе без снижения частоты опроса, что ранее не достигалось в конфигурациях с аналогичными аппаратными ограничениями. Для обоснования выбора элементной базы проведён сравнительный анализ микроконтроллеров ATmega2560 (используемого в исходной системе) и ATmega328P (предлагаемого для модернизации). Основные технические характеристики представлены в таблице 1.



Рис. 2. Алгоритм работы системы захвата движений человека
 Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

При учёте общей стоимости изготовления устройства снижение себестоимости составит 13,8%. С учётом дополнительных компонентов (второй мультиплексор, разъёмы) общее снижение себестоимости оценивается в 8,3%.

На рисунке 2 представлен алгоритм работы модернизированной системы захвата движения. Исходная программа [14], разработанная для системы регистрации и об-

работки данных, имела объём 32,8 Кб. Это превышает максимально допустимый объём памяти для загрузки в микроконтроллер ATmega328P, что делает невозможным её прямое использование в новой архитектуре.

В результате декомпозиции были получены две подпрограммы объёмом 32,13 Кб для микроконтроллера 1 и 32,02 Кб для микроконтроллера 2 [15]. Суммарный объём кода составил 64,15 Кб.

Таблица 2

Сравнительные результаты быстродействия систем

Параметр	Конфигурация А	Конфигурация Б
Среднее время цикла обработки, мс	115,62	67,39
Максимальное время цикла, мс	116,81	68,0
Частота обновления данных, Гц	100 (стабильно)	100 (стабильно)
Объём занимаемой Flash-памяти, Кб	32,8	64,15 (суммарно)

Источник: составлено авторами по результатам данного исследования.

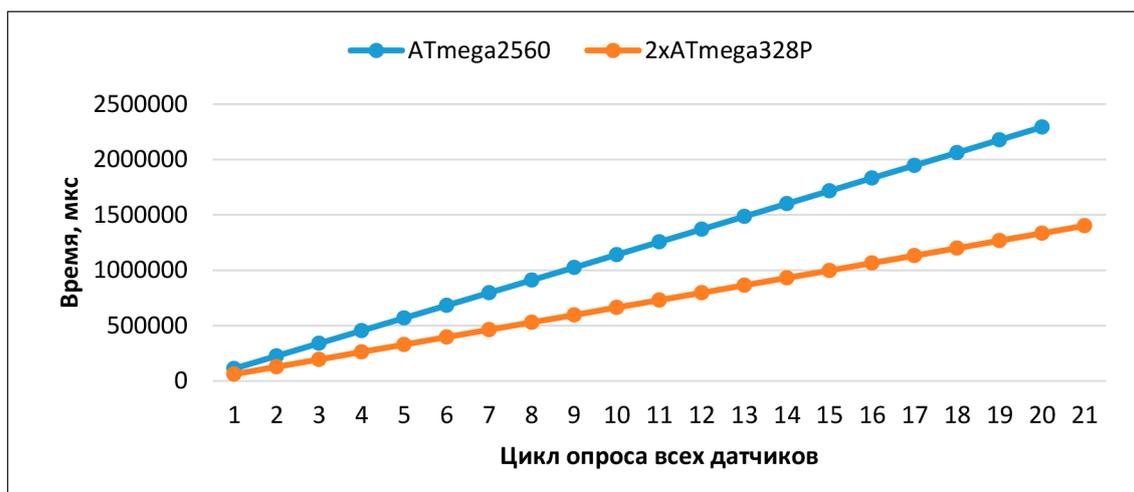


Рис. 3. Отношение времени цикла обработки исходной конфигурации к модернизированной
Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

Результаты исследования и их обсуждение

Для верификации эффективности предложенного подхода было проведено сравнение двух конфигураций системы: конфигурация А (один микроконтроллер ATmega2560), последовательный опрос датчиков, монолитная программа. Конфигурация Б (два микроконтроллера ATmega328P), параллельная работа, распределённая обработка.

В ходе сравнения измерялось время полного цикла обработки (опрос всех датчиков, фильтрация, подготовка данных к передаче). Проведено 100 замеров для каждой конфигурации при частоте опроса датчиков 100 Гц. Результаты представлены в таблице 2.

Предложенная архитектура позволила сократить среднее время цикла обработки на 41,7% (со 115,62 до 67,39 мс). Это достигнуто за счёт параллельной работы двух микроконтроллеров: каждый обрабатывает только свою группу датчиков, что исключает простои, характерные для последовательного опроса. На рисунке 3 представлен график, демонстрирующий отношение вре-

мени цикла обработки исходной конфигурации (ATmega2560) к модернизированной (2×ATmega328P).

Максимальное время цикла в новой конфигурации не превышает 68 мс, что гарантирует стабильную работу на частоте 100 Гц без потери данных. В исходной системе пиковые нагрузки приближались к значению в 116 мс.

Заключение

В результате выполненного исследования разработана и экспериментально подтверждена методика построения многоаппаратной системы захвата движения человека на базе MEMS-датчиков, обеспечивающая повышение быстродействия при жёстких стоимостных ограничениях (10–15 тыс. руб.). Предложенная архитектура на основе двух микроконтроллеров ATmega328P позволяет реализовать параллельную регистрацию и обработку данных от 15 инерциальных датчиков MPU-6050.

Экспериментально подтверждено, что переход от последовательной к параллельной обработке позволяет сократить среднее

время цикла на 41,7% (с 115,62 до 67,39 мс) при сохранении стабильной частоты опроса 100 Гц. При этом прирост производительности достигнут исключительно за счёт архитектурных решений, без увеличения тактовой частоты микроконтроллеров, что подтверждает эффективность предложенного подхода.

Экономическая эффективность разработки подтверждена снижением себестоимости устройства на 13,8% в части затрат на микроконтроллеры и на 8,3% в общей структуре затрат.

Предложенная методика может быть воспроизведена при создании аналогичных бюджетных систем, требующих обработки данных от множества датчиков в реальном времени.

Список литературы

1. Хасанов Р. И., Сарайкин А. И. ADAS в задаче позиционирования автотранспортных средств в условиях дефицита визуальной информации // Международный технико-экономический журнал. № 3. 2016. С. 36–42. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_26624668_17028176.pdf (дата обращения: 25.01.2026).
2. Сарайкин А. И. Система регистрации движений водителя одноколейного транспортного средства // Прогрессивные технологии в транспортных системах: материалы XVII Междунар. науч.-практ. конф. Оренбург: ОГУ, 2022. С. 5–13. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50754549> (дата обращения: 25.01.2026).
3. Владимиров С. С., Янковский А. А. Аппаратно-программный комплекс параллельной обработки микросхем флэш-памяти для подготовки системы // Информационные технологии и телекоммуникации. 2020. Т. 8. № 4. С. 60–68. DOI: 10.31854/2307-1303-2020-8-4-60-68. EDN: VILRJF. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44676723> (дата обращения: 25.01.2026).
4. Владимиров С. С., Когновицкий О. С. Модульный комплекс параллельного имитационного моделирования для исследований систем передачи данных с помехоустойчивым кодированием // Электросвязь. 2017. № 11. С. 48–53. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_30459918_83061501.pdf (дата обращения: 27.01.2026).
5. Данилюк Е. И., Мунерман В. И. Программно-аппаратный комплекс для параллельной обработки распределенных больших данных // Системы компьютерной математики и их приложения. 2018. № 19. С. 129–134. EDN: XRVLVD. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_35177109_43117959.pdf (дата обращения: 22.01.2026).
6. Мунерман В. И. Реализация параллельной обработки данных в облачных системах // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2017. Т. 13. № 2. С. 57–63. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_30258633_62654397.pdf (дата обращения: 25.01.2026).
7. Овчаренко О. И. Построение модели для оценки эффективности параллельного алгоритма циклической редукции // Вестник Таганрогского института управления и экономики. 2014. № 2 (20). С. 74–75. EDN: UCGQSH. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_23865822_76759469.pdf (дата обращения: 21.01.2026).
8. Поляков В. С., Поляков С. В., Авдюк О. А., Наймов В. Ю., Павлова Е. С., Муха Ю. П. Взаимодействие параллельных // Инженерный вестник Дона. 2017. № 2 (45). С. 57. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_29911719_73264443.pdf (дата обращения: 25.01.2026). EDN: ZEONBH.
9. Thompson W. C., Yung Y.-F. Parallel process scheduling for efficient data access: пат. US10289447B1; заявитель и патентообладатель SAS Institute Inc. № 16/221,752; заявл. 17.12.2018; опубл. 14.05.2019. 30 с. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/ec/9a/e9/8071a5d5b50110/US10289447B1.pdf> (дата обращения: 25.01.2026).
10. Golombek O., Diamant N. Parallel processing of fetch blocks of data: пат. US11734009B2; заявитель и патентообладатель Arm Limited. № 15/996,843; заявл. 04.06.2018; опубл. 22.08.2023. 10 с. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/c2/fb/3d/ce80b8c2e3c4dd/US11734009.pdf> (дата обращения: 25.01.2026).
11. Kahn M. Data grouping for efficient parallel processing: пат. US11036471B2; заявитель и патентообладатель SAP SE. № US16/001; заявл. 2018-06-06; опубл. 15.06.2021. 28 с. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/87/58/7f/a1b0a2a91080a0/US11036471.pdf> (дата обращения: 22.01.2026).
12. McGibney G. H., Gray P. T., Morrison G. D., Van Ostrand D. K. Data sensing circuit with parallel digital filter processing: пат. US12149257B2; заявитель и патентообладатель SigmaSense, LLC. № 18/299,734; заявл. 13.04.2023; опубл. 19.11.2024. 46 с. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/32/38/51/37e1639cc1bbd4/US12149257.pdf> (дата обращения: 25.01.2026).
13. Syed Arshad Rahman., Michael I. Hvizdos, Leonid Shamis. Parallel data transfer to increase bandwidth for accelerated processing devices: пат. US10672095B2; заявитель и патентообладатель ATI Technologies ULC № US15/843,663; заявл. 15.12.2017; опубл. 02.06.2020. 17 с. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/0a/b4/ca/9a759a4538328d/US10672095.pdf> (дата обращения: 25.01.2026).
14. Свид. о рег. прогр. ср-ва № 2021618035 «Программа для регистрации параметров движения человека» / А. И. Сарайкин; заявитель и обладатель ОГУ. зарег. 21.05.2021. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_46312002_38240029.pdf (дата обращения: 27.01.2026).
15. Свид. о рег. базы данных № 2024622414 «Показатели быстродействия системы регистрации и обработки параметров движения человека» / А. И. Сарайкин; заявитель и обладатель ОГУ. зарег. 03.06.2024. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_67981999_97018258.pdf (дата обращения: 25.01.2026).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.