Секция 3. СОВРЕМЕННЫЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

DOI: 10.58168/PBHT2026_357-365
УДК 378.147:621.38

МОДЕРНИЗАЦИЯ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА ПО КУРСУ «ЯДЕРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА»: ОТ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ ATMEGA ДО ОДНОПЛАТНЫХ КОМПЬЮТЕРОВ RASPBERRY PI

MODERNIZATION OF THE LABORATORY WORKSHOP ON THE COURSE «NUCLEAR ELECTRONICS»: FROM ATMEGA MICROCONTROLLERS TO RASPBERRY PI SINGLE-BOARD COMPUTERS

Титова Л.В., кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой ядерной физики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Воронеж, Россия

Titova L.V., PhD in Physics and Mathematics, Docent, Head of the Nuclear Physics Department, Voronezh State University, Voronezh, Russia

Дьячков В.В., кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры ядерной физики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Воронеж, Россия

Dyachkov V.V., PhD in Physics and Mathematics, Docent, Associate Professor of the Nuclear Physics Department, Voronezh State University, Voronezh, Russia

Аннотация. В статье представлен опыт модернизации лабораторного практикума по дисциплине «Ядерная электроника» для студентов магистратуры, обучающихся по направлению 14.04.02 «Ядерные физика и технологии». Проект реализуется при поддержке грантового конкурса для преподавателей магистратуры Стипендиальной программы Владимира Потанина. В основе модернизации лежит переход от устаревшей элементной базы стандарта КАМАК к современным программируемым решениям на базе микроконтроллеров ATmega328P и одноплатных компьютеров RaspberryPi. Описаны два ключевых этапа разработки: создание базовых модулей для изучения основ программирования и схемотехники и последующая интеграция сложных измерительных систем (АЦП, блоки высокого напряжения, анализаторы спектра) в архитектуру крейта КАМАК. Представлены разработанные лабораторные работы, направленные на изучение характеристик фотоэлектронных умножителей и сцинтилляционных детекторов. Показано, что предложенный подход обеспечивает поэтапное формирование профессиональных компетенций и позволяет студентам приобрести навыки, востребованные в современных ядерно-физических лабораториях и на производстве.

Ключевые слова: ядерная электроника, микроконтроллеры ATmega328P, RaspberryPi, КАМАК, лабораторный практикум, модернизация образования, спектрометрические системы.

Abstract. The article presents the experience of modernizing the laboratory workshop on the discipline «Nuclear Electronics» for master's degree students enrolled in the program 14.04.02

© Титова Л. В., Дьячков В. В., 2026

«Nuclear Physics and Technologies». The project is supported by the Vladimir Potanin Fellowship Program's grant competition for master's degree teachers. The modernization is based on the transition from the outdated CAMAC standard component base to modern programmable solutions based on ATmega328P microcontrollers and Raspberry Pi single-board computers. Two key stages of development are described: the creation of basic modules for studying the fundamentals of programming and circuit design, and the subsequent integration of complex measurement systems (ADC, high-voltage power supplies, spectrum analyzers) into the CAMAC crate architecture. The developed laboratory works aimed at studying the characteristics of photomultiplier tubes and scintillation detectors are presented. It is shown that the proposed approach ensures the gradual formation of professional competencies and allows students to acquire skills in demand in modern nuclear physics laboratories and in industry.

Keywords: nuclear electronics, ATmega328P microcontrollers, Raspberry Pi, CAMAC, laboratory workshop, modernization of education, spectrometric systems.

ВВЕДЕНИЕ

Подготовка высококвалифицированных специалистов в области ядерной физики и технологий невозможна без глубокого освоения методов экспериментальной ядерной электроники. Дисциплина «Ядерная электроника» занимает ключевое место в учебном плане магистратуры, формируя у студентов понимание принципов работы детекторов, спектрометрических трактов, систем сбора и обработки данных. Традиционно лабораторный практикум по данной дисциплине на кафедре ядерной физики Воронежского государственного университета (ВГУ) базировался на оборудовании стандарта КАМАК [1], разработанном в 1970-1980-х годах. Несмотря на высокую надежность и функциональность, моральное устаревание элементной базы, отсутствие современной документации и сложность ремонта создают серьезные препятствия для эффективного обучения.

В то же время современная промышленность и научные лаборатории активно переходят на использование программируемых микроконтроллерных систем и одноплатных компьютеров, которые обеспечивают гибкость, низкую стоимость и простоту интеграции. Возникает объективная необходимость модернизации лабораторной базы, которая позволила бы студентам осваивать как фундаментальные принципы ядерной электроники, так и современные методы цифровой обработки сигналов.

Целью данной работы является описание опыта реализации проекта «Редизайн дисциплины магистратуры «Ядерная электроника»», поддержанного грантовым конкурсом для преподавателей магистратуры Стипендиальной программы Владимира Потанина. В статье представлены три ключевых этапа модернизации: 1) внедрение лабораторных работ на базе микроконтроллеров ATmega328P (платформа Arduino UNO R3) для формирования базовых навыков программирования и схемотехники; 2) изучение платформы на микрокомпьютерах RaspberryPi построенные на базе процессоров архитектуры ARM; 3) разработка и интеграция специализированных модулей на базе на базе микроконтроллеров ATmega328P и микрокомпьютеров RaspberryPi в архитектуру крейта КАМАК для решения задач спектрометрии [2].

1. ПЕРВЫЙ ЭТАП: ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВ НА БАЗЕ ATMEGA328P

Первоначальной задачей проекта стало создание доступной и понятной стартовой платформы, позволяющей студентам, зачастую не имеющим глубоких знаний в области программирования микроконтроллеров, быстро войти в курс дела. В качестве базовой платформы была выбрана Arduino UNO R3 на микроконтроллере ATmega328P [3]. Этот выбор обусловлен широкой распространенностью платформы, наличием обширной документации и простотой среды разработки Arduino IDE.

В рамках первого этапа были подготовлены и опубликованы два учебных пособия [4,5]. Разработанный лабораторный практикум [5] включает цикл работ, построенных по принципу «от простого к сложному»:

1. **Базовые навыки работы с микроконтроллером:** «Мигающий светодиод», «Светодиодный маяк», «Пульсация светодиодов», «Светофор на светодиодах». Эти работы позволяют студентам освоить настройку портов ввода-вывода, использование функций задержки, написание простых алгоритмических конструкций.
2. **Взаимодействие с дискретными датчиками и устранение помех:** «Кнопка и светодиод», «Светодиод с подтягивающим резистором», «Дребезг кнопки». Здесь студенты знакомятся с проблемой дребезга контактов и методами ее программного подавления, что является критически важным при создании надежных измерительных систем.
3. **Работа с аналоговыми сигналами:** «Чтение аналогового сигнала», «Управление яркостью светодиода», «Два светодиода с потенциометром». Данные работы вводят понятие аналогово-цифрового преобразования и широтно-импульсной модуляции (ШИМ), позволяя понять, как микроконтроллер взаимодействует с аналоговым миром.
4. **Применение датчиков физических величин:** «Датчик освещенности». Эта работа является мостиком к применению микроконтроллеров для сбора данных с реальных сенсоров.

Все лабораторные работы снабжены подробными электрическими принципиальными схемами и листингами программного кода, что позволяет студентам не просто собирать макеты по инструкции, но и анализировать связь между программным алгоритмом и аппаратной реализацией. В качестве среды разработки используется свободно распространяемое программное обеспечение Arduino IDE.

Первый этап позволил решить важную методическую задачу: ликвидировать разрыв между теоретическими знаниями в области цифровой электроники и практическими навыками программирования. Студенты, освоившие базовый цикл работ, оказываются готовы к переходу на следующий уровень – разработке специализированных модулей для ядерной спектрометрии.

2. ВТОРОЙ ЭТАП: ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВ НА БАЗЕ МИКРОПРОЦЕССОРА ARM

На втором этапе явилась разработка платформы на микрокомпьютерах RaspberryPi построенные на базе процессоров архитектуры ARM [6,7]. Эти устройства сочетают компактность, достаточную вычислительную мощность, энергоэффективность и широкие возможности подключения периферийного оборудования. Наличие полноценной операционной системы, развитых сетевых интерфейсов и удобных средств программирования

делает Raspberry Pi эффективной платформой для создания измерительных и управляющих комплексов.

Значимость применения Raspberry Pi [6–8] в ядерной электронике определяется рядом факторов. Во-первых, данные устройства могут использоваться в качестве центрального узла сбора и обработки экспериментальной информации. Благодаря поддержке различных интерфейсов (GPIO, I2C, SPI, UART, USB, Ethernet), Raspberry Pi обеспечивает подключение датчиков, аналого-цифровых преобразователей, модулей регистрации импульсов и других специализированных устройств. Во-вторых, наличие операционной системы позволяет реализовать сложные алгоритмы фильтрации, статистической обработки и визуализации данных непосредственно в процессе эксперимента. В-третьих, встроенные сетевые возможности обеспечивают организацию удалённого мониторинга и передачи информации в локальные или распределённые вычислительные системы.

Кроме того, Raspberry Pi отличается доступностью и модульностью, что особенно важно в учебном процессе и при разработке прототипов экспериментальных установок. Возможность быстрой конфигурации аппаратной части и гибкость программной реализации позволяют адаптировать систему под конкретные исследовательские задачи. В условиях лабораторного практикума это даёт студентам возможность самостоятельно проектировать элементы измерительных систем, анализировать принципы их функционирования и оптимизировать алгоритмы работы.

Второй этап направлен на формирование у обучающихся целостного представления о принципах построения микрокомпьютерных систем на базе архитектуры ARM и их применении в задачах ядерной электроники. В первой части рассматриваются архитектурные особенности процессоров семейства ARM, принципы их организации и эволюция развития. Понимание архитектурных основ позволяет глубже осмыслить принципы функционирования одноплатных компьютеров и микроконтроллерных систем.

Практическая часть второго этапа представлена в форме лабораторных работ, предусматривающих поэтапное освоение методов управления цифровыми и аналоговыми устройствами, использования прерываний, протоколов обмена данными и аналого-цифрового преобразования. Выполнение данных работ формирует у студентов навыки проектирования электрических схем, программирования интерфейсов и анализа результатов работы аппаратуры. Особый акцент делается на применении полученных знаний для решения задач регистрации и обработки экспериментальных данных.

В рамках второго этапа было подготовлено к публикации учебное пособие «Введение в схемотехнику и программирование микрокомпьютеров на базе процессора ARM» (авторы: Титова Л.В., Дьячков В.В.).

3. ТРЕТИЙ ЭТАП: ИНТЕГРАЦИЯ СОВРЕМЕННЫХ МОДУЛЕЙ В СТАНДАРТ КАМАК

Следующим и наиболее важным этапом проекта стала разработка программируемых модульных блоков, которые, сохраняя аппаратную совместимость с существующим крейтом КАМАК [1,9], реализуют современные алгоритмы сбора и обработки данных на базе микроконтроллеров ATmega328P и одноплатных компьютеров RaspberryPi. Ключевой

инновацией стало добавление во внутреннюю шину управления системы КАМАК протоколов последовательной передачи данных SPI и I2C. Это позволяет интегрировать современные компоненты в устаревшую, но надежную механическую и электрическую инфраструктуру крейта. В рамках третьего этапа было подготовлено к публикации учебное пособие «Микрокомпьютерная и микроконтроллерная модульная спектрометрическая система измерительного комплекса КАМАК: лабораторный практикум» (авторы: Титова Л.В., Дьячков В.В.).

Разработаны следующие модули:

1) **Программируемый модуль АЦП для спектрометрической системы на базе ATmega328P.** Модуль собран на макетной плате и использует внешний USB-порт для связи с ПК, где специальная программа отображает спектрограмму в реальном времени. Это решение позволяет студентам понять принципы работы многоканального анализатора, не углубляясь на начальном этапе в тонкости протоколов обмена с крейтом.

2) **Программируемый модуль генерации импульсных спектрометрических сигналов (ГИСС) на базе ATmega328P.** Модуль предназначен для имитации сигналов детекторов. Он позволяет программно менять частоту, скважность и форму импульсов. Уникальной особенностью является использование генератора псевдослучайных чисел для моделирования амплитудного распределения, имитирующего спектральные линии различных радионуклидов методом Монте-Карло. Этот модуль незаменим для отладки и калибровки спектрометрических трактов без использования реальных радиоактивных источников.

3) **Программируемый модуль высокого напряжения (ВН) на базе ATmega328P.** Модуль обеспечивает программную установку высокого напряжения от 0 до 3 кВ для питания сцинтилляционных детекторов. Он оснащен графическим дисплеем для отображения текущего состояния и светодиодными индикаторами полярности и статуса выхода на номинальное напряжение.

4) **Программируемый модуль сбора и хранения данных (анализатор спектра) на базе процессора ARM (RaspberryPi 5).** Это наиболее сложный модуль, собранный в корпусе, соответствующем форм-фактору КАМАК. Он включает в себя одноплатный компьютер RaspberryPi 5, высокоточный 10-канальный АЦП (High-Precision AD HAT ADS1263) и двунаправленные шинные формирователи для связи с магистралью КАМАК по протоколу SPI. Модуль способен оцифровывать сигналы одновременно от нескольких детекторов, формировать и сохранять их спектры, а также обмениваться данными с другими модулями в крейте. Использование полноценного компьютера на базе ARM-архитектуры открывает широчайшие возможности для реализации сложных алгоритмов цифровой обработки сигналов (цифровые фильтры, анализ формы импульса и т.д.).

Параллельно с разработкой модулей велась работа над созданием детектирующих систем. Был собран и отлажен сцинтилляционный детектор на базе ФЭУ-37 с повторителем на полевом транзисторе, а также начато использование кремниевого фотоэлектронного умножителя (SiPM). Для последнего разрабатывается корпус и система сочленения со сцинтиллятором.

На основе созданной материальной базы подготовлены две комплексные лабораторные работы:

1. **«Изучение характеристик фотоэлектронного умножителя (на примере ФЭУ-37)».** В работе студенты исследуют спектральную чувствительность ФЭУ, максимальную частоту сигналов, длительность и «мертвое время» импульсов, а также зависимость эффективности регистрации от напряжения питания.

2. **«Изучение сцинтилляционных свойств кристаллов NaI(Tl), CsI(Tl), ZnS».** Данная работа направлена на определение световыхода, эффективности регистрации и времени высвечивания для различных сцинтилляторов.

Обе работы предполагают сборку измерительной установки, включающей разработанные модули в крейте КАМАК, источник питания, осциллограф и ПК со специальным программным обеспечением. На рисунке 1 представлен общий вид части крейта КАМАК с разработанными модулями для выполнения лабораторных работ, где порядковый номер на рисунке соответствует следующим обозначениям: 1 – ВН-1500 – Программируемый модуль высокого напряжения на базе микроконтроллера ATmega328P; 2 – ГИСС – Программируемый модуль генератора импульсов спектрометрических сигналов (ГИСС) на базе микроконтроллера ATmega328P; 3 – АЦП-100 – Программируемый модуль анализатора спектра на базе процессора ARM; 4 – АЦП – Программируемый модуль АЦП на базе микроконтроллера ATmega328P; 5 – ПНН-34 – Порты низких напряжений.

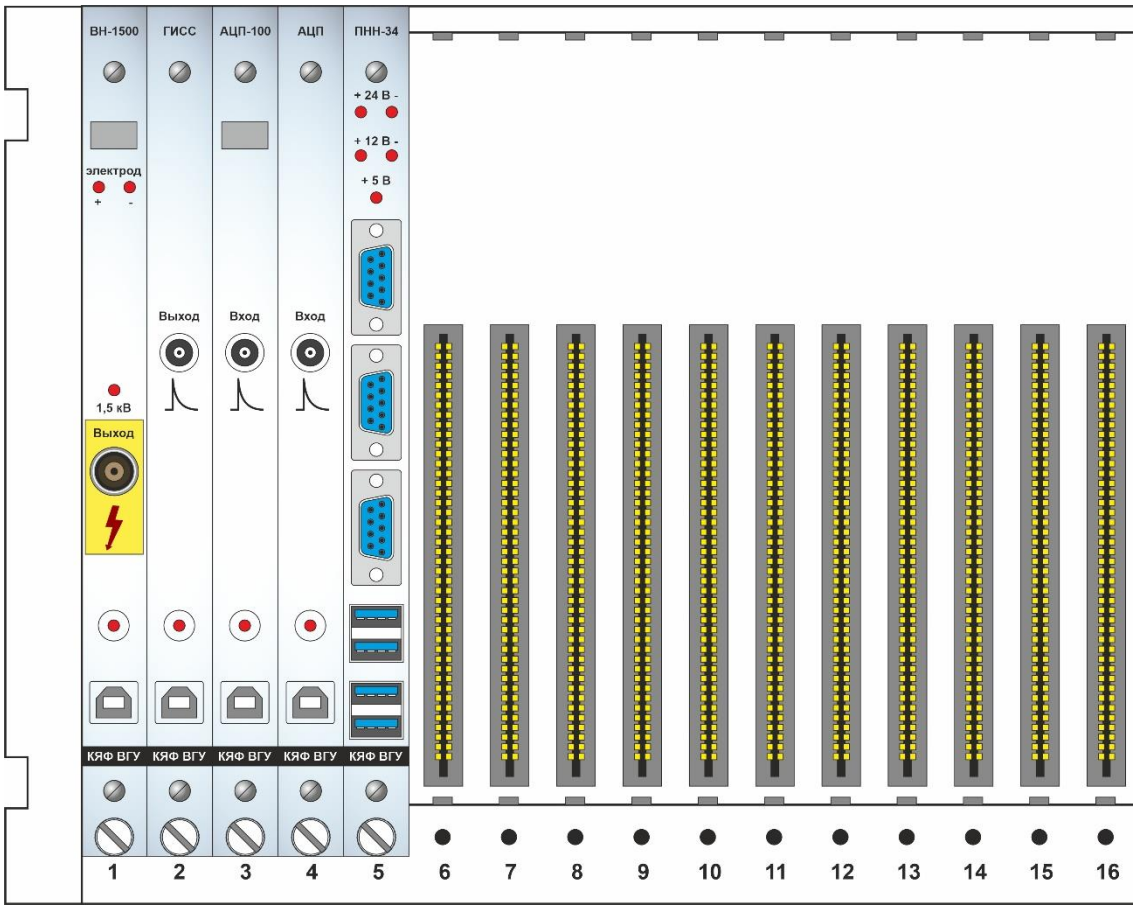


Рисунок 1 – Общий вид части крейта КАМАК с разработанными программируемыми модулями

На рисунке 2 приведена функциональная схема одной из лабораторных установок с программируемыми модулями.

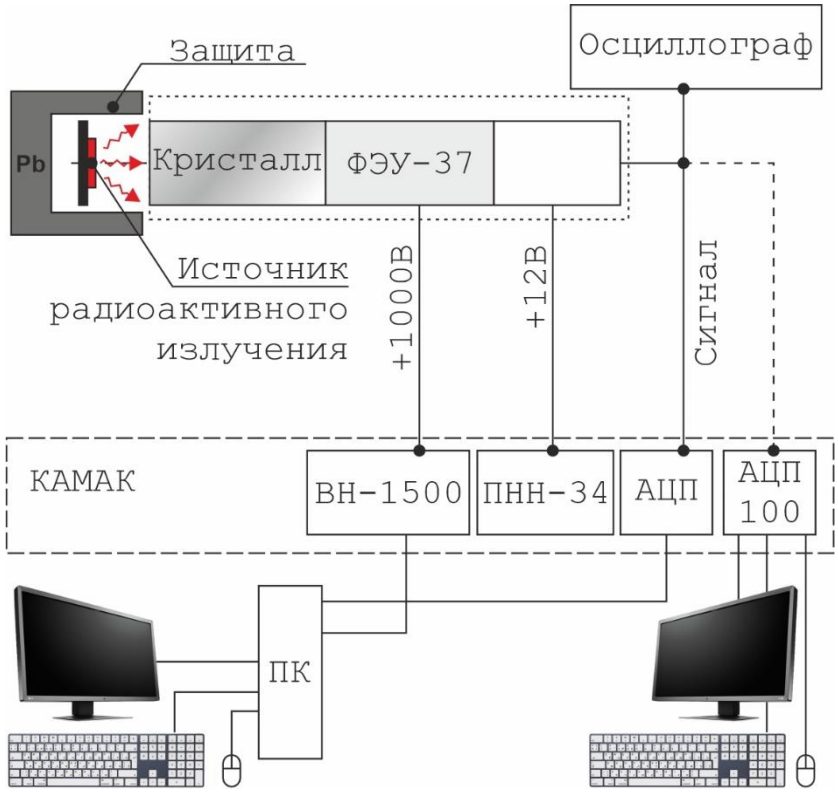


Рисунок 2 – Измерительная схема лабораторной установки

В качестве результата измерений на рисунке 3 показан пример выполнения соответствующей лабораторной работы, который выводится на монитор ПК.

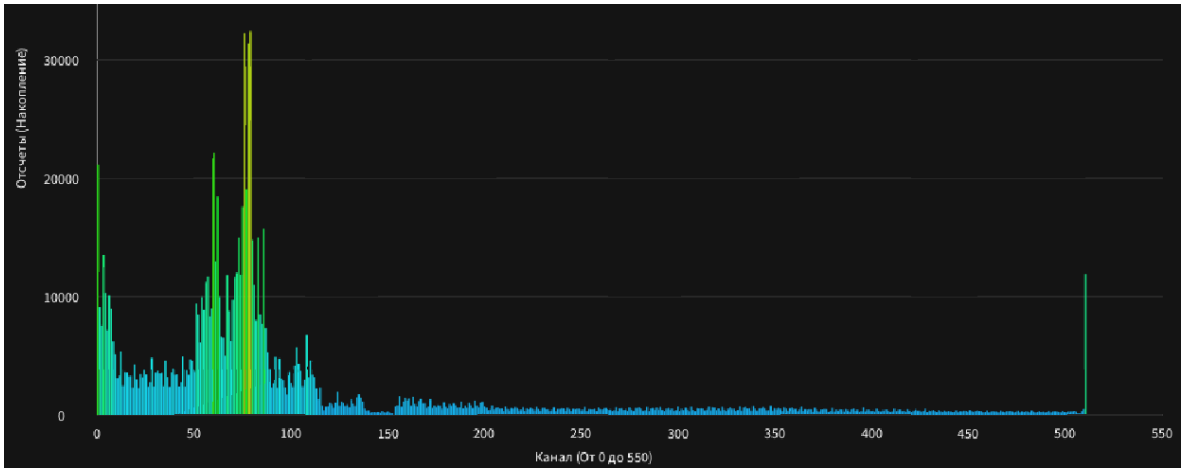


Рисунок 3 – Пример спектра от сигналов, поступающих с программируемого модуля АЦП

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализуемый проект модернизации лабораторного практикума по ядерной электронике позволяет выстроить целостную систему подготовки магистрантов. На первом этапе, работая

с платформой Arduino UNO R3, студенты приобретают фундаментальные навыки программирования микроконтроллеров и проектирования простых измерительных схем. На втором этапе эти навыки переносятся в профессиональную область: студенты работают с реальными модулями, интегрированными в стандарт КАМАК, изучают принципы построения спектрометрических трактов и современные методы цифровой обработки сигналов на базе одноплатных компьютеров.

Разработанные модули не только используются в учебном процессе, но и служат основой для выполнения выпускных квалификационных работ магистров. Тематика этих работ охватывает как совершенствование самих модулей, так и их применение для решения конкретных научных задач.

Предложенный подход к модернизации обеспечивает преемственность знаний и позволяет готовить специалистов, способных эффективно работать как с современным, так и с унаследованным научным оборудованием, что особенно важно для предприятий и научных центров атомной отрасли. Дальнейшее развитие проекта предполагает тиражирование разработанных лабораторных установок и внедрение в учебный процесс методов анализа данных с использованием машинного обучения.

Благодарности. Проект «Редизайн дисциплины магистратуры «Ядерная электроника»» реализуется победителем грантового конкурса для преподавателей Титовой Ларисой Витальевной при поддержке Благотворительного фонда Владимира Потанина.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клайн, Ф. М. Стандарт КАМАК в автоматизации физического эксперимента / Ф. М. Клайн, Г. И. Соловьев, В. И. Федоров. – Москва: Энергоатомиздат, 1985. – 272 с.

2. Leo, W. R. Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments: A How-to Approach / W. R. Leo. – 2nd ed. – Berlin: Springer-Verlag, 1994. – 378 p.

3. MegaAVR ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P // Data Sheet Microchip, 2020. – 653 p.

4. Двуреченский, В. И. «Ядерная электроника. Часть 1. Введение в программирование универсального контроллера интерфейсов модульных АСНИ на базе плат Arduino» : учебное пособие / В. И. Двуреченский, Л. В. Титова. – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2025. – 47 с.

5. Титова, Л. В. Введение в схемотехнику и программирование микроконтроллера ATmega328P: учебное пособие: учебное пособие / Л. В. Титова, В. В. Дьячков. – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2025. – 122 с.

6. Петин, В. А. Микрокомпьютеры Raspberry Pi. Практическое руководство / В. А. Петин. – СПб.: БХВ-Петербург, 2015. – 240 с.

7. Raspberry Pi 5 Product Brief. – Raspberry Pi Ltd., 2023. – URL: https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-5/.

8. Михайлов, В. В. Микроконтроллеры AVR: учебное пособие / В. В. Михайлов. – Москва: Радио и связь, 2018. – 320 с.

9. Кузин, Г. И. Стандарт КАМАК, порты ввода-вывода IBM PC // Методические указания к лабораторной работе №2 практикума «Технические средства автоматизации научных исследований» / Г. И. Кузин. – Новосибирск, НГУ, 2003. – 25 с.

REFERENCES

1. Kline, F. M. CAMAC standard in automation of physical experiments / F. M. Kline, G. I. Soloviev, V. I. Fedorov. – Moscow: Energoatomizdat, 1985. – 272 p.

2. Leo, W. R. Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments: A How-to Approach / W. R. Leo. – 2nd ed. – Berlin: Springer-Verlag, 1994. – 378 p.

3. MegaAVR ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P // Data Sheet Microchip, 2020. – 653 p.

4. Dvurechensky, V. I. "Nuclear Electronics. Part 1. Introduction to Programming a Universal Interface Controller for Modular ASNI Based on Arduino Boards": a tutorial / V. I. Dvurechensky, L. V. Titova. – Voronezh: VSU Publishing House, 2025. – 47 p.

5. Titova, L. V. Introduction to Circuit Design and Programming of the ATmega328P Microcontroller: a tutorial: a tutorial / L. V. Titova, V. V. Dyachkov. – Voronezh: VSU Publishing House, 2025. – 122 p.

6. Petin, V. A. Raspberry Pi Microcomputers. A Practical Guide / V. A. Petin. – St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2015. – 240 p.

7. Raspberry Pi 5 Product Brief. – Raspberry Pi Ltd., 2023. – URL: https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-5/.

8. Mikhailov, V. V. AVR Microcontrollers: A Tutorial / V. V. Mikhailov. – Moscow: Radio and Communications, 2018. – 320 p.

9. Kuzin, G. I. CAMAC Standard, IBM PC I/O Ports // Guidelines for Laboratory Work No. 2 of the Practical Course "Technical Means of Automation of Scientific Research" / G. I. Kuzin. – Novosibirsk, NSU, 2003. – 25 p.