

## ТЕХНОЛОГИЯ И ПРОИЗВОДСТВО

### Расширение возможностей фотометра КФК-3

#### **Артур Владимирович Березов**

Старший преподаватель кафедры физики и астрономии  
Северо-Осетинский государственный университет им. К.Л. Хетагурова  
Владикавказ, Россия  
berartvlad@mail.ru  
ORCID 0009-0004-0958-8936

#### **Диана Иосифовна Валиева**

Независимый исследователь  
Северо-Осетинский государственный университет им. К.Л. Хетагурова  
Владикавказ, Россия  
diana.valiyeva@bk.ru  
ORCID 0009-0000-2501-8424

Поступила в редакцию 01.06.2024

Принята 21.07.2024

Опубликована 15.08.2024

УДК 535.85:681.7

EDN VMECDI

BAK 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)  
OECD 02.02.AC. AUTOMATION & CONTROL SYSTEMS

#### **Аннотация**

В представленном исследовании подробно описан процесс разработки современной установки для проведения спектральных методов анализа на основе широко используемого фотометра КФК-3. В работе уделено особое внимание схемам подключения прибора к персональному компьютеру, а также разработанному программному обеспечению, которое позволяет существенно расширить функциональные возможности фотометра КФК-3. Благодаря внедрению этого программного обеспечения стало возможным не только частично автоматизировать процесс анализа получаемых спектров, но и обеспечить их удобную передачу в сторонние системы для более глубокого и разностороннего анализа данных. Кроме того, в работе детально описан процесс модификации самого фотометра, направленный на обеспечение возможности его полного управления через ПК. Это включает в себя как аппаратные изменения, так и разработку соответствующих протоколов передачи данных между компьютером и контроллером, который предлагается использовать в качестве управляемого блока для фотометра. Описаны принципы работы программного обеспечения, алгоритмы взаимодействия между компонентами системы, а также проведен анализ эффективности и надежности предложенного решения. Проведенные испытания показали значительное повышение точности и скорости проведения спектрального анализа по сравнению с исходной моделью фотометра. Разработанная система обладает высокой степенью гибкости и может быть легко адаптирована под различные требования и задачи лабораторных исследований. Предлагаемое решение имеет большой потенциал для использования в научных и промышленных целях, где требуется высокая точность и автоматизация процессов спектрального анализа. Таким образом, модернизация фотометра КФК-3 и разработка сопутствующего программного обеспечения открывают новые возможности для исследований в области спектроскопии и аналитической химии.

### **Ключевые слова**

КФК-3, спектрофотометр, получение спектров, Arduino, аналогово-цифровой преобразователь.

### **Введение**

Хлебопекарная отрасль является одной из ключевых сфер пищевой промышленности, обеспечивающей население основным продуктом питания. Качество хлебобулочных изделий напрямую влияет на здоровье и благополучие общества. Поэтому контроль качества продукции на всех этапах производства является приоритетной задачей предприятий хлебопекарной индустрии. Одним из важных инструментов в этом процессе является использование фотометра КФК-3, который позволяет проводить спектрофотометрический анализ различных компонентов сырья и готовой продукции. Фотометры серии КФК-3 широко применяются в лабораторной практике для количественного определения содержания различных веществ в растворах по величине поглощения света. Принцип действия прибора основан на измерении оптической плотности растворов при определенной длине волны. Это позволяет проводить анализ содержания белков, жиров, углеводов, витаминов и других компонентов, влияющих на качество и питательную ценность хлебобулочных изделий. В хлебопекарной отрасли фотометр КФК-3 активно используется для контроля качества муки, воды, дрожжей и других ингредиентов. Например, определение активности амилазы в муке с помощью данного прибора позволяет оценить ее ферментативную способность. Амилаза играет ключевую роль в процессе разложения крахмала до простых сахаров, необходимых для питания дрожжей. Исследования показывают, что оптимальный уровень активности амилазы в муке способствует повышению объема хлеба на 15–20%.

Популярные отечественные фотометры серии КФК (КФК-3) в настоящее время широко используются в контрольно-измерительных лабораториях малых предприятий и в учебных лабораториях высших, средних учебных заведениях. Модификации последних лет КФК-3 и КФК-3М предназначены для измерения коэффициента направленного пропускания, оптической плотности и скорости изменения оптической плотности прозрачных жидкостных растворов на выставленной заранее длине волны. Фотометр фотоэлектрический (КФК-3-01 «ЗОМЗ», 2004), а также для определения концентрации веществ в растворах после предварительной градуировки фотометров потребителем. Их применяют для оснащения медицинских учреждений, на предприятиях водоснабжения, в металлургической, химической, пищевой промышленности и других отраслях (КФК-3-01 «ЗОМЗ», 2004). Получение спектральной зависимости перечисленных параметров на этом приборе затруднительно, так как в таком случае, необходимо получить оптические показатели не при определенной длине волны, а в диапазоне длин волн. Оптическая схема некоторых модификаций прибора составлена с использованием дифракционной решетки в качестве диспергирующего элемента и имеет потенциал для модификации (например КФК-3 и КФК-3М) из серийного фотометрического прибора в спектрофотометр по оптической схеме Черни-Тернера для нужд контрольно-измерительных и учебных лабораторий.

В данной работе описываются бюджетный вариант относительно несложной доработки некоторых модификации этого фотометра, позволяющие использовать его в качестве спектрофотометра. Для автоматического разворачивания нужного диапазона (сканирования) и точной установки длины волны, был установлен двигатель 28BYJ-48. Можно так же использовать аналогичные шаговые двигатели. Двигатель 28BYJ-48 позволяет точно позиционировать положение, отсчитывать углы и удерживать текущее положение.

### **Материалы и методы исследования**

Для контролирования процессом, был выведен сигнальный провод с фотодиода. Управляется прибор микроконтроллером Mega328, который установлен на плату Arduino Nano. В данный микроконтроллер встроен 10-битный аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Но для получения более точных измерений использовалось внешний 16-битный АЦП, основанный на микросхеме ADS1115 (Кучерявый, 2023). Этот АЦП имеет интерфейс передачи данных I<sup>2</sup>C. Встроенный усилитель дает возможность измерения малых напряжений, не ограничивая разрешение АЦП. В следующей таблице приведены коэффициенты усиления и пределы измеряемого напряжения.

Таблица 1. Пределы измеряемого напряжения на входе АЦП

Коэффициент усиления	Пределы измерений (В)
2/3	6,144
1	4,096
2	2,048
4	1,024
8	0,512
16	0,256

Таким образом, с разработанным программным обеспечением, этот прибор превращается в удобный, функциональный спектрофотометр, не уступающий некоторым серийно выпускаемым аналогам, применяемые для исследовательских нужд. Подобные модификации практикуются для компьютеризации старой советской спектрофотометрической техники (Балобанов, 2007; Ракицкий, 2019).

### Результаты и обсуждение

Управление прибором происходит через блок управления, который получает показания фотодиода и положение ручки установки длины волны. В свою очередь, блок управления передает полученные данные через USB в персональный компьютер. Контролирование установленной длины волны на спектрофотометре может производиться не только напряжением выдаваемого переменным резистором, установленного на ручку, но и установкой реперных точек для известных длин волн, например с помощью лазера или светофильтра с известными оптическими характеристиками. МК Mega328, который управляет спектрофотометром, содержит энергонезависимую память, куда можно записывать текущую длину волны и от этой длины отсчитывать шаги двигателя при сканировании спектра. Затем перед выключением опять записать в энергонезависимую память текущее положение ручки.

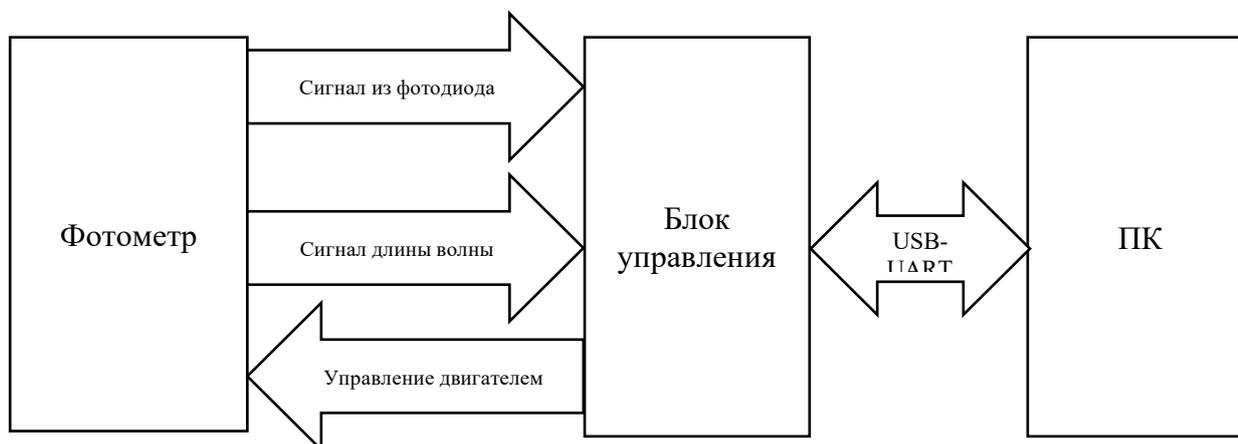


Рисунок 1. Блок-схема подключения фотометра к ПК

Микросхему ADS1115 к Arduino можно подключить по представленной ниже схеме.

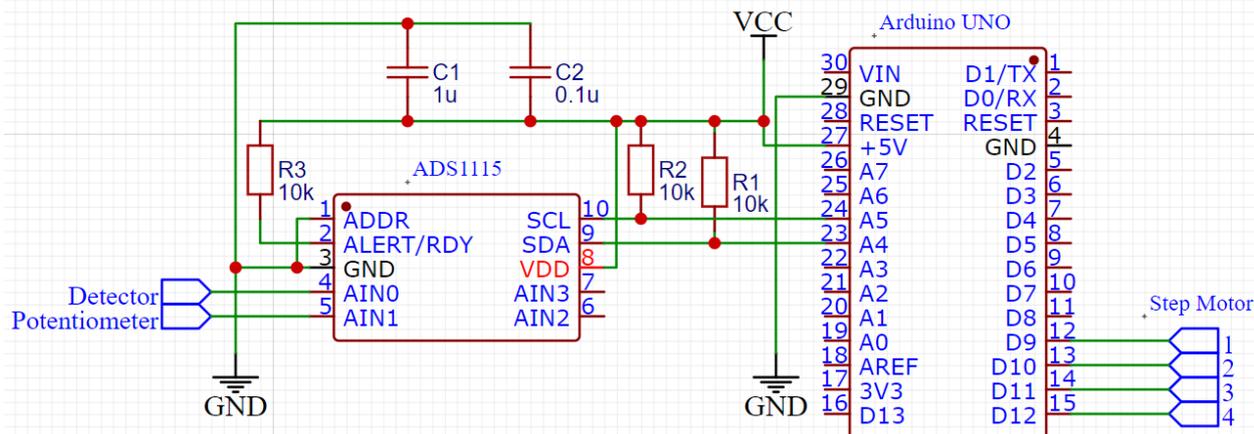


Рисунок 2. Принципиальная схема добавленной электроники

Свободные цифровые выходы Mega328 подаются на обмотки двигателя после предварительного усиления их драйвером двигателя. Питание для двигателя лучше заводить отдельно или добавить дополнительные элементы для фильтрации помех, создаваемых обмотками двигателя. Входы «Detector» и «Potentiometer» являются входами АЦП, куда подводятся сигналы с детектора КФК и потенциометра соответственно. Необходимо экранировать электронику для защиты от внешних источников шума.

После оцифровки сигналы попадают на микроконтроллер, который, в свою очередь, в зависимости от программы может по-разному обрабатывать данные. Микроконтроллер подключается к персональному компьютеру (ПК), на котором запущена программа по управлению спектрофотометром. Программа разработана в среде Delphi7 и позволяет получать спектры (Березов, 2017). Между микроконтроллером на приборе и программой на ПК обмен данными производится по специальному протоколу, описание которого приведено ниже.



Рисунок 3. Внешний вид модифицированного фотометра

Соединение спектрофотометра с ПК производится через USB-кабель. Обмен данными производится через виртуальный COM-порт. Скорость соединения которого, необходимо установить в 115200 бод. При включении питания, настраивается соединение с компьютером по последовательному интерфейсу. Далее, постоянно отправляются на компьютер результаты измерения из АЦП. Помимо отправки, контроллер постоянно ожидает команды от компьютера. При отправке команды из компьютера, происходит разбор этой команды и ее выполнение. Формат большинства команд, отправляемых компьютером, имеет следующий вид:

«Символ» – «Число». При этом «Символ» соответствует команде, а «Число» – параметру.

Список команд:

1. V – установка задержки между шагами двигателя в микросекундах (Рекомендуется не менее 2000);
2. P – установка количества шагов, между считываниями с аналогового порта и отправкой на компьютер.
3. D – направление (D0 – Вперед, D1 - Назад)
4. Z – количество считываний.

Также имеется несколько дополнительных команд для работы с двигателем, которые не требуют параметра:

1. START – запускает вращение двигателя;
2. STOP – останавливает вращение двигателя;
3. B – команда быстрого перехода в начало спектра;
4. E – команда быстрого перехода в конец спектра.

Таким образом, алгоритм работы программы при сканировании спектра пропускания производится следующим образом:

1. проверка на то, что процесс не достиг конца шкалы (при достижении конца программа останавливает сканирование и сообщает ПК, что сканирование завершено);
2. осуществление указанного количества шагов двигателем (устанавливается параметром P – например P10);
3. задержка программы на указанное количество микросекунд (устанавливается параметром V – например V2000);
4. несколько считываний АЦП и отправка суммы всех значений в ПК (количество считываний задается параметром Z);
5. переход к пункту 1.

При этом программа постоянно проверяет наличие входящих команд, поэтому в любой момент можно прервать сканирование. Пункт 3 необходим для уменьшения влияния работы двигателя на водящие сигналы из АЦП. Продолжительность этой задержки задается параметром V и подбирается экспериментальным путем.

Сканирование спектра пропускания может производиться как в одну, так и в обратную сторону. Но сканирование рекомендуется всегда производить в одну сторону. Затем командой быстрого возврата в начало необходимо вернуть длину волны в начало спектра.

Для управления спектрометром написана программа, которая автоматизирует получение спектров на КФК-3. Данная программа может работать как самостоятельно, так и быть встроена в другую программу, которая позволяет наглядно производить обработку полученных графиков, их сохранение и передачу в другие популярные программы по обработке спектров (Березов, 2017).

Для того чтобы встроить программу по работе с КФК-3 в программу по обработке графиков, ее необходимо поместить в папку «Компоненты/Источники». После запуска программы обработки графиков в меню «Файл/Источники» эта программа добавится автоматически – в качестве источника данных.

При выборе источника в программе «Графики» добавленная программа запустится, и на нее в качестве параметра передастся TSP-порт, по которому программа обработки графиков будет ожидать

команды (49111). После запуска программы для работы с этим прибором необходимо будет выбрать порт и скорость соединения. После этого на экране отобразится другое окно, через которое можно взаимодействовать с прибором:

- задавать направление сканирования;
- запускать двигатель;
- останавливать двигатель;
- запускать с производением записи (запустить сканирование);
- останавливать запись;
- переходить на начало или конец спектра;
- производить настройки прибора.

Если нажать на параметры, то получим доступ к параметрам, через которые можно отрегулировать скорость сканирования и его точность. Взаимодействие между программами производится по сокетам. Часть набора правил, по которым производится обмен данными между приложениями, приведено ниже:

1. NewGraph GraphName – создание нового графика. Создает график с именем, следующим за командой NewGraph;
2. AddPoint GraphName 1 12 – добавление точки в график с указанным именем;
3. LoadFile FileName – загрузить файл, где файл – полное имя программы, которую необходимо загрузить;
4. GetListGraphs «FileName» – выгрузить список загруженных графиков в следующем виде:  
Индекс Путь Имя\_графика.

Все параметры разделяются символом табуляции.

Контроль содержания глютена в муке также является важным аспектом в производстве хлеба. Глютен отвечает за формирование клейковинного каркаса теста, от которого зависит структура и пористость готового изделия. С помощью фотометра КФК-3 можно точно определить количество и качество глютена. При отклонении этого показателя на 2% может наблюдаться ухудшение структуры мякиша и снижение объема готового хлеба на 5–7%. Важным направлением использования фотометра КФК-3 является анализ воды, используемой в производстве. Качество воды напрямую влияет на процессы брожения и вкус готового продукта. Фотометр позволяет определить содержание жесткости, наличие железа, нитратов и других растворенных веществ. Например, превышение концентрации железа в воде всего на 0,3 мг/л может привести к появлению нежелательного привкуса в хлебе и сокращению его срока хранения на 1–2 дня.

Дрожжи, как основной разрыхлитель в тесте, требуют особого контроля. С помощью фотометра КФК-3 можно оценить активность дрожжевых культур по интенсивности поглощения света суспензией дрожжей. Снижение активности дрожжей на 10% может увеличить время брожения теста на 30 минут и вызвать недовыход объема хлеба на 5%. Не менее важным является контроль содержания сахаров в тесте. Определение остаточного содержания сахаров позволяет регулировать процессы брожения и карамелизации корочки при выпекании. По данным исследований, изменение содержания сахара в тесте на 1% влияет на цвет корочки и аромат хлеба, что заметно для 70% потребителей. Фотометр КФК-3 используется и для определения содержания витаминов в хлебобулочных изделиях. Особенно актуально это при обогащении хлеба витаминами группы В и витамином Е. Например, добавление в тесто витамина В1 (тиамина) в количестве 0,5 мг на 100 г продукта повышает его пищевую ценность и способствует улучшению обменных процессов у потребителей. Согласно статистике, регулярное употребление обогащенного хлеба может снизить риск гиповитаминоза на 25%. В последние годы вырос интерес к производству хлеба с добавлением пищевых волокон и минералов. Контроль их содержания с помощью фотометра КФК-3 позволяет создавать продукты функционального назначения. Добавление 10% отрубей в тесто увеличивает содержание пищевых волокон в хлебе на 15%, что способствует улучшению работы пищеварительной системы потребителей.

С точки зрения экономической эффективности, использование фотометра КФК-3 позволяет предприятиям снизить количество бракованной продукции на 10–12%. Это достигается за счет своевременного обнаружения отклонений в качестве сырья и оперативного корректировки технологических процессов. В результате сокращаются производственные потери, что ведет к увеличению прибыли предприятия на 5–7% в год. Контроль качества продукции является также важным фактором в соблюдении нормативных требований и стандартов. Фотометры КФК-3 позволяют проводить анализы в соответствии с ГОСТами и международными стандартами ISO. Это упрощает процедуру сертификации продукции и повышает доверие потребителей к бренду. По данным маркетинговых исследований, наличие сертификатов качества увеличивает продажи на 8–10%. В свете растущих требований к безопасности пищевой продукции фотометр КФК-3 выступает незаменимым инструментом в выявлении и предотвращении возможных загрязнений. Например, определение наличия тяжелых металлов, таких как свинец и кадмий, в сырье и готовой продукции позволяет предотвратить риски для здоровья потребителей. Превышение допустимой концентрации свинца всего на 0,1 мг/кг может привести к серьезным отравлениям и негативным последствиям для репутации производителя.

Технические преимущества фотометра КФК-3 заключаются в его высокой точности и стабильности измерений. Прибор обеспечивает воспроизводимость результатов с погрешностью не более 0,2%, что соответствует современным требованиям лабораторного контроля. Кроме того, простота в эксплуатации и обслуживание прибора снижают затраты на обучение персонала и техническое обслуживание оборудования. Разработка и внедрение специализированного программного обеспечения для фотометра КФК-3 позволяет автоматизировать процесс сбора и обработки данных. Это сокращает время анализа на 20–25% и снижает вероятность ошибок, связанных с человеческим фактором. Автоматизация процессов способствует повышению общей производительности лаборатории на 15%. Стоит отметить, что фотометр КФК-3 может быть интегрирован в систему управления качеством предприятия, что обеспечивает единый подход к контролю всех этапов производства. Такой комплексный подход позволяет повысить эффективность системы менеджмента качества на 10–12% и улучшить показатели продукции по критериям безопасности и соответствия стандартам. Перспективы развития хлебопекарной отрасли связаны с внедрением инновационных технологий и совершенствованием методов контроля качества. В этом контексте фотометр КФК-3 остается актуальным и востребованным инструментом. Его применение способствует разработке новых видов продукции, ориентированных на здоровое питание, и удовлетворению растущего спроса на функциональные продукты.

### **Заключение**

Спектрофотометры КФК-3, выпускаемые в нескольких исполнениях – КФК-3, КФК-3-01 и КФК-3-01-«ЗОМЗ» – основаны на оптической схеме Черни-Тернера с дифракционной решеткой. В таком исполнении разрешающая способность зависит от ширины щелей. При уменьшении ширины щели разрешающая способность спектрофотометра увеличивается, однако происходит снижение количества света, достигая детектора, из-за чего снижается уровень сигнала. Поэтому для достижения лучшего результата авторы рекомендуют уделить внимание экранированию от шумов, а для увеличения чувствительности сменить штатный фотодиод на другой – с более низким соотношением сигнала к шуму и более высокой чувствительностью. После внесенных изменений рекомендуется настроить усиление входа АЦП таким образом, чтобы сигнал был наиболее высоким и при этом не происходило переполнение сигнала. Предлагаемые модификации в этой статье совместно с рекомендациями позволяют существенно расширить возможности спектрофотометра. При уменьшении ширины щели в 4 раза, разрешение спектрофотометра может достигать до половины нанометра, что превосходит некоторые спектрофотометры, применяемые в исследовательских лабораториях. При этом усложняется управление прибором – в этом случае для его работы будет необходим персональный компьютер.

В заключение можно сказать, что фотометр КФК-3 играет важную роль в обеспечении высокого качества хлебобулочных изделий. Его использование в хлебопекарной отрасли способствует повышению эффективности производства, сокращению затрат, улучшению качества продукции и

удовлетворению потребностей потребителей. Инвестиции в современные методы анализа и контроля качества, такие как фотометр КФК-3, являются стратегически важными для развития предприятий и укрепления их позиций на рынке. По данным аналитических отчетов, предприятия, активно использующие спектрофотометрический анализ в производстве, увеличивают свою долю рынка в среднем на 5% ежегодно. Это свидетельствует о высокой эффективности и рентабельности внедрения фотометра КФК-3 в производственные процессы. Таким образом, современный подход к контролю качества с использованием фотометра КФК-3 является неотъемлемой частью успешного развития хлебопекарной отрасли.

### Список литературы

1. Балобанов А.В., Михеев Г.М. Автоматизация двойного монохроматора мдр-6у для спектроскопии комбинационного рассеяния света // Химическая физика и мезоскопия. 2007. Т. 9. № 4. С. 430-436.
2. Березов А.В., Туриев А.М. Анализ спектров люминесценции и комбинационного рассеяния света средствами MATLAB и Delphi 7 // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки: мат. VII Межд. науч.-прак. конф. (24-26 июня 2017 г., Владикавказ). Владикавказ: Веста, 2017. С. 90-94.
3. Кучерявый А.И., Передистов Е.Ю. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023616728 Российская Федерация. Программа для микроконтроллера «Galvanic DAQ»: № 2023615114: заявл. 17.03.2023: опубл. 31.03.2023. Заявитель – Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича.
4. Ракицкий А.А. Программное обеспечение управления спектрометрическим комплексом на базе монохроматора МДР-6 // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: мат. XIX Межд. науч.-техн. конф. студ., асп. и мол. ученых (25-26 апреля 2019 г., Гомель). Министерство образования Республики Беларусь, Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого. Под общ. ред. А.А. Бойко. Гомель: Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого, 2019. С. 570-572.
5. Фотометр фотоэлектрический КФК-3-01 «ЗОМЗ». Техническое описание и инструкция по эксплуатации. 2004.

### Expanding the capabilities of the KFK-3 photometer

#### **Artur V. Berezov**

Senior Lecturer at the Department of Physics and Astronomy  
K.L. Khetagurov North Ossetian State University  
Vladikavkaz, Russia  
berartvlad@mail.ru  
ORCID 0009-0004-0958-8936

#### **Diana I. Valieva**

Independent researcher  
K.L. Khetagurov North Ossetian State University  
Vladikavkaz, Russia  
diana.valiyeva@bk.ru  
ORCID 0009-0000-2501-8424

Received 01.06.2024  
Accepted 21.07.2024  
Published 15.08.2024

UDC 535.85:681.7

EDN VMECDI

VAK 4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences)

OECD 02.02.AC. AUTOMATION & CONTROL SYSTEMS

### **Abstract**

The presented study provides a detailed description of the development process of a modern setup for conducting spectral analysis methods based on the widely used KFK-3 photometer. Special attention is paid to the device's connection schemes to a personal computer, as well as to the developed software, which significantly expands the functional capabilities of the KFK-3 photometer. Thanks to the implementation of this software, it became possible not only to partially automate the process of analyzing obtained spectra, but also to ensure their convenient transfer to external systems for more in-depth and comprehensive data analysis. In addition, the paper provides a detailed description of the modification process of the photometer itself, aimed at enabling full control via a PC. This includes both hardware adjustments and the development of appropriate data transfer protocols between the computer and the controller, which is proposed as the control unit for the photometer. The principles of software operation, the algorithms for interaction between system components, and an analysis of the effectiveness and reliability of the proposed solution are presented. The tests conducted showed a significant improvement in the accuracy and speed of spectral analysis compared to the original photometer model. The developed system is highly flexible and can be easily adapted to various requirements and tasks of laboratory research. The proposed solution has great potential for use in scientific and industrial applications where high precision and automation of spectral analysis processes are required. Thus, the modernization of the KFK-3 photometer and the development of accompanying software open new opportunities for research in the fields of spectroscopy and analytical chemistry.

### **Keywords**

KFK-3, spectrophotometer, spectrum acquisition, Arduino, analog-to-digital converter.

### **References**

1. Balobanov A.V., Mikheev G.M. Automation of the MDR-6u double monochromator for Raman spectroscopy // Chemical physics and mesoscopy. 2007. Vol. 9. № 4. pp. 430-436.
2. Berezov A.V., Turiev A.M. Analysis of luminescence and Raman scattering spectra by means of MATLAB and Delphi 7 // Young scientists in solving urgent problems of science: mat. of the VII Inter. scien. and prac. conf. (June 24-26, 2017, Vladikavkaz). Vladikavkaz: Vesta, 2017. pp. 90-94.
3. Kucheryavy A.I., Peredistov E.Y. Certificate of state registration of a computer program No. 2023616728 Russian Federation. The program for the «Galvanic DAQ» microcontroller: No. 2023615114: application 03.17.2023: published 03.31.2023. The applicant is the St. Petersburg State University of Telecommunications named after Prof. M.A. Bonch-Bruевич.
4. Rakitsky A.A. Software for controlling a spectrometric complex based on the MDR-6 monochromator // Research and development in the field of mechanical engineering, energy and management: mat. of the XIX Inter. scien. and prac. conf. of students, asp. and young scien-s (April 25-26, 2019, Gomel). Ministry of Education of the Republic of Belarus, Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi. Under the general editorship of A.A. Boyko. Gomel: Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi, 2019. pp. 570-572.
5. Photoelectric photometer KFK-3-01 «ZOMZ». Technical description and operating instructions. 2004.