

DOI 10.37539/2949-1991.2026.41.6.035
УДК 685.518:543.645

Григорьян Леонтий Рустемович, к.т.н., доцент,
Кубанский государственный университет
Grigoryan Leonty Rustemovich,
Kuban State University

Ривный Иван Алексеевич, студент,
Кубанский государственный университет
Rivny Ivan Alekseevich,
Kuban State University

ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ ПРОМЫВОЧНОЙ СТАНЦИИ DWP ПЛАНШЕТОВ SOFTWARE AND HARDWARE IMPLEMENTATION OF A LABORATORY WASHING STATION FOR DWP PLATES

Аннотация. В данной статье рассмотрена программно-аппаратная реализация лабораторной промывочной станции для планшетов формата DWP (Deep Well Plate). Проведён анализ существующих методов автоматизации пробоподготовки. Предложена модульная архитектура системы на базе микроконтроллерного управления и перистальтических насосов, а также разработано программное обеспечение для гибкого задания протоколов промывки. Приведены результаты экспериментальной апробации прототипа, демонстрирующие точность дозирования и воспроизводимость результатов.

Abstract. This article discusses the software and hardware implementation of a laboratory washing station for DWP (Deep Well Plate) plates. An analysis of existing methods for automating sample preparation is conducted. A modular system architecture based on microcontroller control and peristaltic pumps is proposed, along with software for flexible washing protocol configuration. The results of experimental testing of the prototype are presented, demonstrating dosing accuracy and reproducibility of results.

Ключевые слова: Промывочная станция, DWP планшеты, программно-аппаратный комплекс, автоматизация лабораторных исследований, пробоподготовка.

Keywords: Washing station, DWP plates, hardware-software complex, laboratory automation, sample preparation.

Современные биохимические и фармацевтические лаборатории всё чаще обращаются к автоматизации рутинных процессов пробоподготовки. Планшеты с глубокими лунками DWP широко применяются для хранения образцов, культивирования клеток и проведения реакций. Одной из ключевых операций является промывка – удаление остатков реагентов и непрореагировавших компонентов, влияющая на чистоту и достоверность последующих анализов.

Ручная промывка многоячеечных планшетов трудоёмка, характеризуется низкой воспроизводимостью и повышает риск контаминации. Промышленные автоматические станции часто имеют высокую стоимость и недостаточную гибкость в настройке параметров для специфических лабораторных задач. Это формирует потребность в разработке доступного и адаптируемого решения, сочетающего аппаратные средства управления потоками жидкостей с программным интерфейсом для гибкой конфигурации протоколов промывки.

Целью настоящей работы является разработка программно-аппаратной реализации лабораторной промывочной станции для DWP планшетов, обеспечивающей автоматизацию процесса, возможность программирования параметров и мониторинг выполнения операции.



Инерциальные измерительные устройства представляют собой комбинацию нескольких типов сенсоров, каждый из которых выполняет свою функцию. Аналогично, в разрабатываемой системе каждый аппаратный модуль (насос, клапан, привод позиционирования) выполняет строго определённую задачу, а их скоординированная работа обеспечивается программным управлением.

В области лабораторной автоматизации известны различные подходы к реализации систем промывки планшетов. Большинство промышленных решений представляют собой законченные устройства с фиксированными режимами и проприетарным ПО. В работах [1–3] показана целесообразность использования модульных платформ для создания специализированных лабораторных систем. Исследования [4, 5] демонстрируют, что применение перистальтических насосов и электромагнитных клапанов в сочетании с программным управлением позволяет достичь приемлемой точности при относительно низкой стоимости.

Разрабатываемая промывочная станция построена по модульному принципу (рисунок 1) и включает следующие компоненты:

аппаратный модуль управления (микроконтроллер ESP32);

исполнительные механизмы (перистальтические насосы, электромагнитные клапаны);

система трубок и насадок для подачи и отбора жидкостей;

позиционирующий механизм для перемещения промывочной головки над лунками планшета;

программное обеспечение для управления процессом и мониторинга параметров.

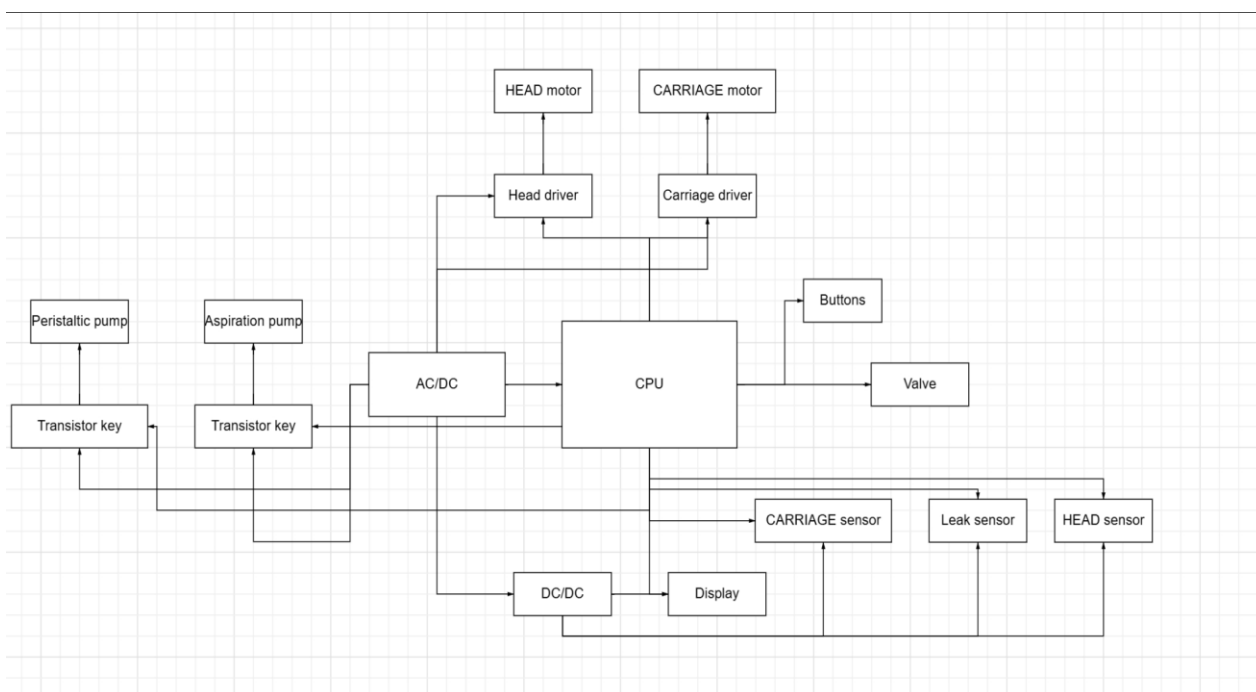


Рисунок 1. Структурная схема программно-аппаратного комплекса

Аппаратная часть построена на базе микроконтроллера ESP32, обеспечивающего дискретное и аналоговое управление исполнительными устройствами. Управление насосами и клапанами осуществляется посредством цифровых выходов с использованием транзисторных ключей. Для позиционирования промывочной головки используется шаговый двигатель с драйвером A4988, обеспечивающий перемещение по координатной сетке



планшета с точностью до 0,1 мм. Параметры движения задаются программно, что позволяет адаптировать систему под форматы 24, 48 или 96 лунок.

Регулирование скорости подачи промывочной жидкости осуществляется изменением частоты вращения перистальтического насоса с использованием ШИМ-сигнала. Контроль объёма подаваемой жидкости обеспечивается калибровкой насосов и программным учётом времени работы.

Программное обеспечение разработано в среде Arduino IDE с использованием языка C++. ПО включает следующие функциональные модули:

модуль конфигурации протоколов – задание количества циклов, объёма, скорости подачи, времени инкубации;

модуль управления позиционированием – перемещение головки с выбором режима (все лунки, выборочно, по строкам/столбцам);

модуль мониторинга – отображение статуса процесса и ведение журнала;

модуль диагностики – самопроверка механизмов и выдача предупреждений.

Взаимодействие между ПО и аппаратным модулем построено на основе протокола UART, обеспечивающего передачу команд и получение подтверждений.

Для проверки работоспособности концепции был собран экспериментальный прототип промывочной станции. Прототип включает насосную группу, промывочную головку с 8 соплами и систему позиционирования на базе шагового двигателя.

Проведена калибровка насосов для определения зависимости подаваемого объёма от времени работы. Для трёх скоростных режимов получены данные (таблица 1).

Таблица 1

Зависимость объёма подачи от времени работы насоса

Скорость насоса, %	Время работы, с	Объём, мкл	Среднее отклонение, %
30	1,0	95	±2,1
50	0,6	98	±2,5
70	0,4	102	±3,4

Полученная точность ($\pm 2-3\%$) является приемлемой для большинства лабораторных задач и сопоставима с характеристиками промышленных образцов. Отклонение возрастает при увеличении скорости, что связано с инерционностью перистальтического насоса и упругостью трубопроводов.

Для оценки воспроизводимости процесса проведены серии экспериментов с использованием стандартного красителя, после чего измерялась оптическая плотность остаточного раствора в лунках. Коэффициент вариации между лунками одной промывки не превышал 5%, что подтверждает стабильность распределения жидкости.

Результаты экспериментальной апробации подтверждают работоспособность предложенной концепции. Основными преимуществами системы являются: гибкость настройки параметров, возможность адаптации под различные форматы планшетов и снижение трудозатрат оператора. Модульный подход позволяет сократить стоимость системы при сохранении ключевых функциональных характеристик.

В ходе экспериментов выявлены факторы, влияющие на точность дозирования: упругость трубопроводов, пульсации потока и качество уплотнений. Для минимизации этих эффектов планируется использование трубопроводов повышенной жёсткости и демпферов пульсаций.

Программная реализация показала удобство интерфейса: оператор способен настроить параметры промывки в течение нескольких минут без привлечения разработчика, что делает систему пригодной для использования в лабораториях с широким спектром методик.



Таким образом, в ходе работы разработана концепция программно-аппаратной реализации лабораторной промывочной станции для DWP планшетов. Предложенная архитектура объединяет модульное аппаратное обеспечение с гибким программным управлением, что позволяет автоматизировать процесс промывки и обеспечить воспроизводимость результатов. Экспериментальный прототип подтвердил достижимость точности дозирования на уровне $\pm 2-3\%$ при достаточной равномерности распределения жидкости по лункам.

Разработанная система может быть рекомендована для использования в биохимических и фармацевтических лабораториях. Дальнейшие направления развития включают интеграцию дополнительных датчиков (уровня жидкости, давления), расширение функционала ПО и создание полноценного прототипа с корпусным оформлением.

Список литературы:

1. Godfrey A., Conway R., Meagher D. Direct measurement of human movement by accelerometry // Medical engineering & physics. – 2008. – Vol. 30 (10). – P. 1364–1386.
2. Picerno P., Iosa M., D'Souza C. Wearable inertial sensors for human movement analysis: a five-year update // Expert review of medical devices. – 2021. – Vol. 18 (sup1). – P. 79–94.
3. Tao W., Liu T., Zheng R. Gait analysis using wearable sensors // Sensors (Basel, Switzerland). – 2012. – Vol. 12 (2). – P. 2255–2283.
4. Airaksinen M., Räsänen O., Ilén E. Automatic Posture and Movement Tracking of Infants with Wearable Movement Sensors // Scientific Reports. – 2020. – Vol. 10 (1). – P. 169.
5. Shumway-Cook A., Woollacott M. Motor Control: translating research into clinical practice. – Philadelphia: Wolters Kluwer Health, 2012.
6. Del Din S., Godfrey A., Galna B. Free-living gait characteristics in aging and Parkinson's disease: impact of environment and ambulatory bout length // Journal of neuroengineering and rehabilitation. – 2016. – Vol. 13 (1). – P. 46.
7. Bandara A., Shimizu H., Watanabe D. Diurnal variations in gait parameters among older adults with early-stage knee osteoarthritis: insights from wearable sensor technology // Scientific reports. – 2025. – Vol. 15 (1). – P. 8026.
8. Zwartjes D. G., Heida T., van Vugt J. Ambulatory monitoring of activities and motor symptoms in Parkinson's disease // IEEE transactions on bio-medical engineering. – 2010. – Vol. 57 (11). – P. 10.1109.
9. Patel S., Park H., Bonato P. A review of wearable sensors and systems with application in rehabilitation // Journal of neuroengineering and rehabilitation. – 2012. – Vol. 9. – P. 21.

