© 2026 Arabian International Conference on Science,Technology and Innovation. All rights reserved.

МИКРОКОНТРОЛЛЕРНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ БИОГАЗОВОЙ УСТАНОВКОЙ НА БАЗЕ ESP32

Содиков У.Х.
докторант (DSc) Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова

Тургунбоев Б.Д.
магистрант совместной образовательной программы Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова и НИЯУ «МИФИ»

DOI:https://doi.org/10.5281/zenodo.22944865

Аннотация: В тезисе представлена доработанная архитектура микроконтроллерной системы управления пилотной биогазовой установкой, ориентированной на эксплуатацию в небольших сельскохозяйственных хозяйствах. Основное внимание уделено не паспортным характеристикам компонентов, а причинам их выбора для конкретного макета, логике управления и ограничениям симуляционной проверки. ESP32 используется для опроса температуры, pH, давления, уровня субстрата и индикативного канала метана, а также для управления нагревателем, мешалкой и аварийным клапаном. При уставке 36,0 °C и гистерезисе 0,8 °C в модели Wokwi получено среднеквадратичное отклонение температуры около 0,52 °C. Отдельно рассмотрены обработка шумов аналоговых каналов, требования к переходу от симуляции к натурному макету и сравнительный сценарий ручного управления. Расчетная стоимость аппаратной части составляет 73–121 USD.

Ключевые слова: биогазовая установка, ESP32, автоматизация, анаэробное сбраживание, гистерезисное регулирование, Wokwi, датчики, Wi-Fi, программная верификация.

Для малых фермерских хозяйств Узбекистана применение биогазовой технологии связано не только с получением возобновляемого топлива, но и с практической задачей переработки навоза и растительных остатков непосредственно в месте их образования. При этом стоимость промышленной автоматики может оказаться несопоставимой с масштабом пилотного реактора. Поэтому в данной работе рассматривается локальная система управления, в которой минимально необходимый набор измерений объединен с недорогим контроллером и дистанционным наблюдением. Такой подход не претендует на замену промышленного ПЛК, а решает более узкую задачу: стабилизировать температурный режим, своевременно выявлять опасные отклонения и сократить необходимость постоянного присутствия оператора [1, 2].

Целью работы является разработка и программная проверка системы автоматического управления пилотной биогазовой установкой на базе ESP32. В отличие от общего описания возможностей микроконтроллера, в исследовании оценивается его пригодность именно для выбранной конфигурации: одного замкнутого температурного контура, циклического перемешивания, четырех диагностических каналов и локального Web-мониторинга.

ESP32 выбран как центральный узел не из-за максимальной производительности, а потому, что в одном модуле совмещаются аналоговые и цифровые входы, интерфейс Wi-Fi и достаточное число линий управления для текущего макета [3]. Аналоговые датчики подключаются к каналам ADC1, чтобы сетевой обмен не создавал программных ограничений для их опроса. Температурный канал вынесен на цифровой DS18B20, что уменьшает зависимость основного регулируемого параметра от шумов встроенного АЦП [5].

© 2026 Arabian International Conference on Science,Technology and Innovation. All rights reserved.

Таблица 1 — Обоснование выбора измерительных каналов для данного макета

Канал	Выбранный элемент	Причина выбора в проекте	Ограничение / альтернатива
Температура	DS18B20	Цифровой 1-Wire; удобен для диапазона 35–37 °C и не занимает канал АЦП	Для высокотемпературных задач термопара универсальнее, но требует отдельного преобразователя
pH	PH-4502C	Доступный канал для раннего предупреждения о смещении кислотности	Требует калибровки; не рассматривается как лабораторный pH-метр
Давление	STAG PS-02 Plus	Механически удобен для газового тракта и доступен для экспериментального макета	Диапазон шире рабочего; необходима калибровка в низконапорной области
Уровень	JSN-SR04T	Бесконтактное измерение и влагозащищенный выносной излучатель	Пена и неровная поверхность могут искажать ультразвуковое измерение
CH_4	MQ-4	Низкая стоимость и достаточность для индикативного порогового контроля	Не заменяет NDIR-анализатор или газовую хроматографию; требуется прогрев и калибровка

Таким образом, температура остается единственным параметром с полноценной обратной связью. pH, давление, уровень и сигнал MQ-4 используются как диагностические величины. Такое разделение уменьшает число исполнительных устройств и делает структуру соразмерной пилотному объекту, сохраняя контроль параметров, наиболее значимых для устойчивости и безопасности процесса.

Температура регулируется двухпозиционно. На каждом проходе основного цикла измеренное значение сравнивается с двумя порогами: если $T \leq 35{,}2$ °C, формируется команда включения нагревателя; если $T \geq 36{,}8$ °C — команда отключения; при $35{,}2 < T < 36{,}8$ °C состояние реле сохраняется. Такой if–then–else принцип исключает непрерывное переключение возле уставки 36,0 °C и соответствует инерционному характеру теплового процесса. Управление мешалкой также реализовано как последовательность условий. Контроллер хранит момент последнего переключения lastSwitchTime. Если мешалка выключена и с этого момента прошло 45 минут, реле включается и время обновляется. Если мешалка включена и прошло 15 минут, реле отключается. Сравнение выполняется по счетчику millis(), поэтому таймер перемешивания не приостанавливает опрос датчиков, аварийную логику и Web-интерфейс [4].

Для аналоговых каналов pH и MQ-4 в программной версии предусмотрено сглаживание скользящим средним с коэффициентом N = 8–10. Это решение введено именно для ожидаемых помех реального макета: дрожание показаний АЦП, наводки от релейных коммутаций и кратковременные выбросы не должны приводить к изменению индикации по единственному отсчету. Для аварийного давления приоритет сохраняется за быстрой реакцией: значение сравнивается с порогом 8 кПа, после чего формируются сигнал тревоги и команда на клапан. Выход pH за 6,5–7,8 и уровня выше 95 % сопровождается предупреждением оператору.

© 2026 Arabian International Conference on Science,Technology and Innovation. All rights reserved.

Уставки сохраняются в энергонезависимой памяти ESP32, а сторожевой таймер используется для восстановления после зависания. Потеря Wi-Fi не разрывает температурный контур: она отключает только удаленное наблюдение, тогда как локальная логика продолжает выполняться. Локальная индикация выполняется на OLED-дисплее, а Web-интерфейс используется для удаленного просмотра текущих параметров. Формат JSON выбран как служебный формат обмена внутри разработанной системы, поскольку позволяет передавать несколько измерений и состояний реле в одном ответе без усложнения структуры программы.

Базовая логика проверялась в Wokwi. В этой среде воспроизводились штатные и аварийные входные сценарии, а тепловая реакция описывалась упрощенной RC-моделью. За 6 часов модельного времени среднеквадратичное отклонение от уставки составило около 0,52 °C, было зафиксировано 28 переключений нагревателя, а цикл мешалки 15/45 минут выполнялся в соответствии с заданным таймером. Пороговая логика срабатывала при pH = 6,31, уровне 96,4 % и сигнале CH_4 = 2680 ppm.

При интерпретации этих результатов важно учитывать идеализированный характер симуляции. Wokwi не воспроизводит в полном объеме электромагнитные наводки, изменение сопротивления соединений, влажность, пузырьки и пену на поверхности субстрата, старение pH-электрода или химическое воздействие компонентов биогаза. Поэтому фильтрация аналоговых каналов и проверка граничных состояний рассматриваются как подготовка к натурному этапу, а значение σ = 0,52 °C — как результат программной модели, а не как метрологически подтвержденная точность реального реактора.

Таблица 2 — Расширенное сравнение автоматического и условного ручного режима

Показатель	Автоматический режим	Ручной режим (модель)
Период контроля температуры	Непрерывный программный опрос	Проверка оператором раз в 2 часа
СКО от уставки	≈ 0,52 °C	≈ 5,45 °C
Диапазон температуры	35,1–37,0 °C	26,5–45,9 °C
Реакция на аварийное отклонение	После очередного цикла опроса	Зависит от присутствия оператора
Архивирование / просмотр данных	OLED + Web; значения доступны дистанционно	Требуется ручная фиксация
Зависимость от человеческого фактора	Ниже при штатной работе	Выше из-за периодичности обходов

Сопоставление показывает преимущество непрерывной обратной связи, однако ручной режим в таблице является расчетным сценарием, а не результатом параллельных натурных испытаний. Поэтому эти числа следует использовать для оценки ожидаемой тенденции, а не как окончательный производственный показатель. Переход от симуляции к лабораторному или фермерскому макету требует дополнительных инженерных мер. Электроника должна размещаться в герметичном корпусе с кабельными вводами, а соединения датчиков — быть защищены от конденсата. Газовая арматура и уплотнения должны сохранять работоспособность во влажной среде и при контакте с примесями биогаза. Силовые цепи нагревателя и привода необходимо физически отделить от низковольтной части, применить предохранители, заземление и развязку релейных каналов. Перед длительным экспериментом обязательны калибровка pH- и датчика давления, проверка герметичности, контроль температуры независимым образцовым термометром и многосуточная регистрация данных.

© 2026 Arabian International Conference on Science,Technology and Innovation. All rights reserved.

Ориентировочная стоимость 73–121 USD относится к инженерной оценке комплекта из массовых радиоэлектронных модулей и исполнительных устройств. Диапазон сформирован по розничным ценам, характерным для открытой интернет-торговли и локальных продавцов электронных компонентов на период подготовки проекта; конкретная торговая площадка не фиксируется. Доставка, возможные импортные платежи, изготовление промышленного корпуса и монтажные работы в указанную сумму не включены, поэтому стоимость следует рассматривать как расчетный ориентир, а не коммерческое предложение. Для каждого измерительного канала указаны причина выбора и ограничения, алгоритм управления описан через последовательность условий, а результаты Wokwi сопровождены оговоркой о влиянии шумов и неидеальностей реального объекта. Автоматический режим в модели обеспечивает $\sigma \approx 0{,}52$ °C против ≈ 5,45 °C в условном ручном сценарии.

Эти результаты подтверждают работоспособность программной логики, но окончательная оценка эффективности должна быть получена после длительных натурных испытаний с защищенной электроникой и откалиброванными измерительными каналами.

Литература

1. Batstone D. J., Keller J., Angelidaki I. et al. The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1) // Water Science and Technology. 2002. Vol. 45, No. 10. P. 65–73.
2. Lithourgidis A. A. et al. A Low-Cost IoT System Based on the ESP32 Microcontroller for Efficient Monitoring of a Pilot Anaerobic Biogas Reactor // Applied Sciences. 2025. Vol. 15, No. 1. Article 34.
3. Espressif Systems. ESP32 Datasheet. Version 3.6.
4. Arduino IDE — официальная документация.
5. Analog Devices / Maxim Integrated. DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer — Datasheet.