

<https://doi.org/10.55764/2957-9856/2025-3-42-57.31>

МРНТИ 50.47

УДК 62-52

М. А. Ли¹, Т. К. Иманалиев², Е. С. Тургынбеков^{*3}, Т. Т. Ибраев⁴, Н. Н. Балгабаев⁵

¹ К.т.н., руководитель лаборатории «управление спросом на воду»

(АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан; limarina76@mail.ru)

² Заведующий отделом «управление водными ресурсами» (ТОО «Казахский научно-исследовательский институт водного хозяйства», Тараз, Казахстан; tonimontana_777@mail.ru)

^{3*} PhD докторант, старший преподаватель кафедры «автоматика и телекоммуникация» (Таразский университет им. М. Х. Дулати, Тараз, Казахстан; Bosik_90@mail.ru)

⁴ К.т.н., ведущий научный сотрудник (АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан; kiwr-t@mail.ru)

⁵ Д.с.-х.н., и.о. генерального директора (ТОО «Казахский научно-исследовательский институт водного хозяйства», Тараз, Казахстан; balgabayev@mail.kz)

СОЗДАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОДАЧИ ВОДЫ НА ОРОСИТЕЛЬНЫХ КАНАЛАХ С МАЛЫМИ РАСХОДАМИ

Аннотация. Повышение эффективности управления водными ресурсами и эксплуатации оросительных каналов напрямую связано с автоматизацией контроля, учета и распределения воды на них, что является ключевым приоритетом в данной сфере. Проблема обеспечения водой для орошения в зонах с недостаточным естественным увлажнением обостряется из-за отсутствия должной эксплуатации оросительных сетей, особенно каналов с малыми расходами. С целью создания автоматизированной системы управления водораспределением на оросительных каналах с малыми расходами разработаны алгоритмы управления гидротехническим затвором. Предложено внедрение ПИД-регулятора, который обеспечивает автоматическое управление открытием и закрытием затвора на основании данных о расходе воды, поступающих от расходамера.

Ключевые слова: автоматизация, алгоритм, затвор гидротехнический, канал оросительный, расход, регулирование, управление.

Введение. Эффективность мелиорации земель во многом определяется состоянием оросительных систем. Современные системы требуют четкого и оперативного управления процессами распределения воды не только на магистральных каналах, но и по каналам межхозяйственной и внутрихозяйственной сети. Отсутствие автоматизированных систем водораспределения на них влечет за собой нарушение планового водопотребления и рост непроизводительных потерь. Автоматизация управления водораспределением позволит создать условия для устойчивого, равноправного вододеления и оперативного контроля для обеспечения потребителей водой в нужные сроки и в необходимом количестве.

Известные ученые, включая Я. В. Бочкарева, М. З. Ганкина, Ю. Г. Иваненко, А. Л. Ильмера, О. П. Кисарова, П. И. Коваленко, В. И. Коржова, Э. Э. Маковского, М. Ф. Натальчука, Е. Е. Овчарова, В. И. Ольгаренко, В. Н. Щедрина и многих других, внесли значительный вклад в совершенствование и оптимизацию водораспределения на оросительных системах. Их исследования охватывают широкий спектр вопросов – от теоретического обоснования необходимости создания оросительных систем до разработки и внедрения передовых технологий управления водораспределением, основанных на автоматизации и телемеханизации, с целью рационального распределения и комплексного использования водных ресурсов.

Необходимость в таких разработках в настоящее время подтверждается множеством научных работ, которые посвящены автоматизированным технологиям управления водными ресурсами на оросительных каналах. Представленные материалы демонстрируют разнообразие рассматриваемых вопросов, связанных с автоматизацией оросительных систем с различными сетями каналов и гидросооружениями, а также их режимами работы и методами автоматизации водораспределения и контроля водопотребления [1–11].

Ученые Киргизии предлагают адаптировать автоматизированные системы водораспределения к специфике своей страны. Ключевым элементом их подхода является разработанный ими метод непосредственного отбора воды. Реализация этих схем осуществляется с помощью гидроавтоматики, в частности водовыпусков-стабилизаторов, которые гарантируют подачу воды в отводы с погрешностью не более $\pm 5\%$ от расчетного расхода [12].

Исследователи из Китая разработали инновационную систему управления водосбережением, основанную на искусственном интеллекте. Эта технология с учетом текущих потребностей и возможностей управления водными ресурсами страны сочетает ПИД-регулирование с передовыми алгоритмами. Такая комплексная технология успешно внедрена в Китае, продемонстрировав значительную экономию воды [13].

Постоянное совершенствование технологий и создание новых разработок в сфере автоматизации процесса управления водными ресурсами на оросительных системах являются ключевым фактором для успешного развития мелиоративной науки и практики. В текущих условиях ограниченности водных ресурсов особую актуальность приобретают задачи разработки систем регулирования расхода воды, обеспечивающих сбалансированное водораспределение посредством автоматизированных систем управления.

Материалы и методы исследования. В рамках текущего научно-исследовательского проекта осуществляется разработка автоматизированной модели гидротехнического затвора для эксплуатации на оросительных каналах с малыми значениями расхода.

Автоматический гидротехнический затвор с водосливным устройством представляет собой инновационный комплекс, предназначенный для точного регулирования, измерения и автоматического управления подачей воды в оросительные каналы. Конструкция включает щитовое затворное устройство, прямоугольный водосливной лоток, треугольный (V-образный) водослив и панель управления с GSM-связью (рисунок 1).

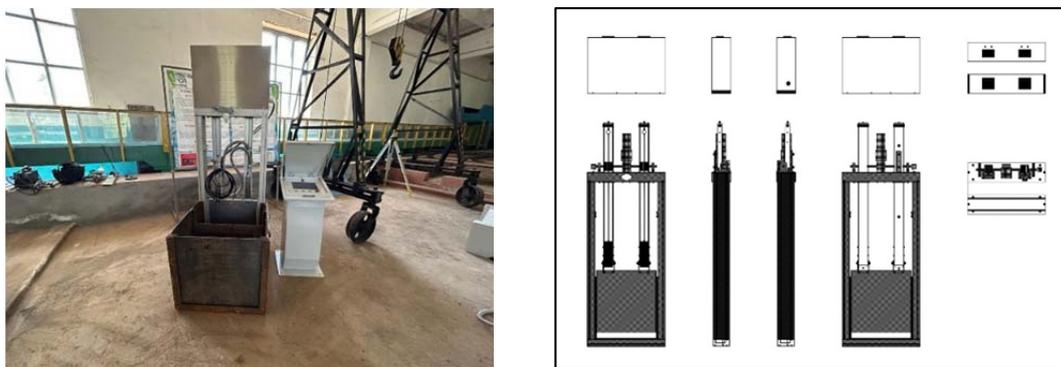


Рисунок 1 – Автоматизированная модель гидротехнического затвора с панелью управления

Figure 1 – Automated model of hydraulic gate with control panel

При выполнении научной работы был применен набор взаимосвязанных методов, обеспечивающих разработку, реализацию и проверку работоспособности автоматизированной системы регулирования расхода воды на оросительных каналах с малыми расходами.

Аналитический метод использовался для расчёта гидравлических характеристик открытого канала, определения соотношений между уровнем воды и расходом, а также для выбора параметров ПИД-регулятора на основе классических уравнений регулирования. Кроме того, с его помощью проведён анализ применимости методов измерения и управления в условиях низких дебитов и нестабильных гидравлических режимов.

Инженерный метод был использован при проектировании архитектуры системы управления, включая разработку функциональных и электрических схем. На основании требований к системе подобраны компоненты: контроллер Siemens S7-1200, исполнительные механизмы, датчики уровня, конечные выключатели, модули ввода/вывода и элементы автономного питания.

Математическое моделирование применялось при разработке и верификации алгоритмов управления в среде программирования TIA Portal. Построены блоки масштабирования аналогового

сигнала, реализованы логические схемы управления затвором и создана структура ПИД-регулятора с параметрической настройкой. Осуществлено моделирование типовых эксплуатационных режимов системы, включая сценарии перегрузки, ошибки измерений и резкого изменения расхода.

Программно-инженерный метод заключался в реализации прикладного программного обеспечения контроллера, где с использованием инструментария ПИА Portal созданы модули обработки сигналов, ПИД-регулирования, интерфейса оператора (HMI), а также блоки диагностики и управления аварийными ситуациями.

Экспериментальный метод был задействован на этапе функционального тестирования разработанной программы на лабораторной установке, имитирующей условия эксплуатации на реальном оросительном канале. Проверялись корректность масштабирования аналогового сигнала, устойчивость работы ПИД-регулятора, реакция системы на изменение уставок, поведение в аварийных режимах.

Комплексное применение указанных методов позволило обеспечить всестороннюю проработку технических и программных решений, а также их адаптацию к условиям эксплуатации оросительных сетей с малыми расходами воды.

В рамках проекта реализованы технические решения, соответствующие современным требованиям к надёжности, энергоэффективности и адаптируемости к условиям сельскохозяйственной эксплуатации.

Разработанная функциональная схема системы управления автоматизированного гидрозатвора содержит графические обозначения всех применяемых элементов электроавтоматики (рисунок 2).

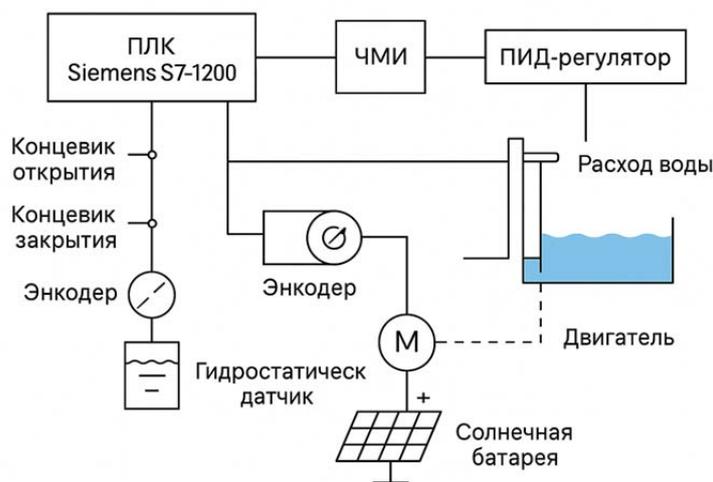


Рисунок 2 – Функциональная схема системы управления автоматизированным гидрозатвором

Figure 2 – Functional diagram of the control system of the automated water shutter

Особенность решения заключается в том, что в качестве измерительного элемента использован гидростатический датчик, фиксирующий уровень воды в канале. Таким образом, расход определяется косвенным способом через преобразование уровня воды в оценочное значение расхода по известным гидравлическим зависимостям.

Подобные датчики традиционно используются в задачах мониторинга уровня, однако в предлагаемом проекте реализована методика косвенного измерения расхода воды на основе уровня с последующим пересчётом в значение расхода через программный модуль масштабирования. Это решение позволяет отказаться от использования дорогостоящих расходомеров и адаптировать систему к условиям малых расходов и нестабильного гидравлического режима. В отличие от типовых решений, ориентированных на прямое измерение расхода, эта система обеспечивает высокую точность при минимальной стоимости оборудования и повышенной надёжности в полевых условиях.

Для управления затвором был выбран контроллер Siemens S7-1200, который зарекомендовал себя как надёжное и удобное решение для задач промышленной автоматизации (рисунок 3).

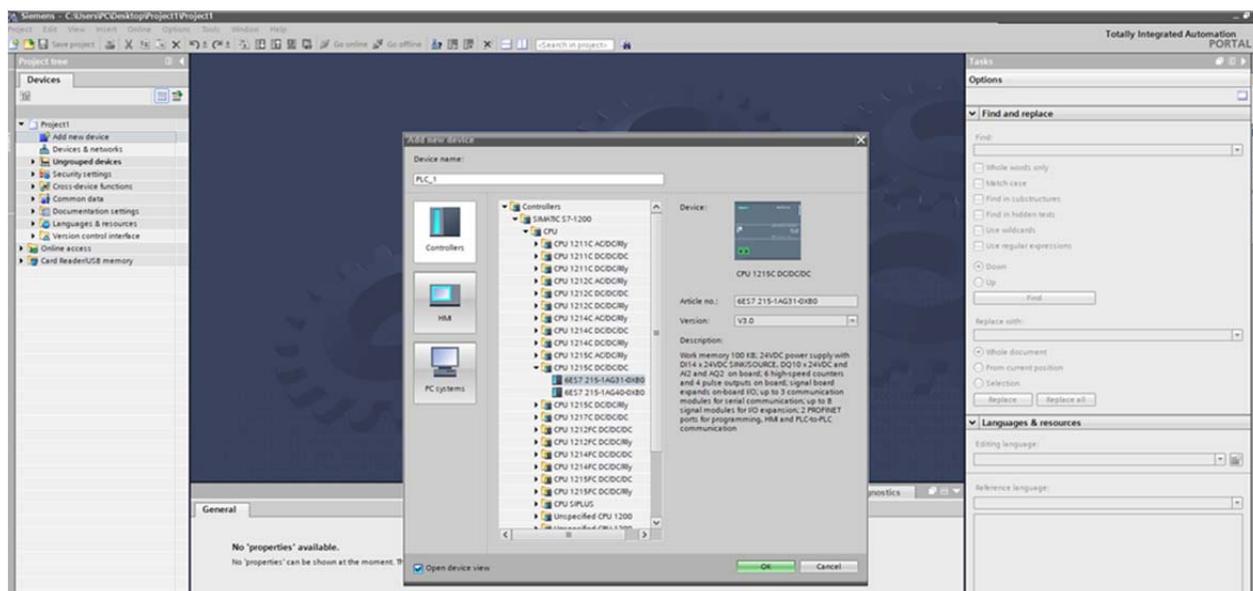


Рисунок 3 – Разработка проекта и подбор контроллеров

Figure 3 – Design development and controller selection

Контроллер Siemens S7-1200 обладает рядом технологических и эксплуатационных преимуществ. В ходе проектирования рассмотрены альтернативные варианты, включая контроллеры Arduino, Delta (серия DVP-SX2) и PLCnext AXС F 2152. Анализ показал, что только Siemens S7-1200 обеспечивает оптимальное сочетание таких параметров, как:

- наличие встроенных блоков ПИД-регулирования (PID_3Step и PID_Compact), не требующих стороннего программного обеспечения;
- поддержка аналоговых и цифровых модулей ввода/вывода;
- промышленное исполнение, устойчивость к перепадам напряжения и внешним воздействиям;
- развитая программная среда TIA Portal с возможностью моделирования, отладки и визуализации процессов;
- наличие сертифицированной технической поддержки и широкого сообщества разработчиков.

Выбор контроллера базировался на требованиях к автономной работе, энергонезависимости, совместимости с солнечным питанием и минимальной сложности обслуживания в условиях ограниченной инфраструктуры.

На рисунке 4 представлена визуализация сравнительного анализа контроллеров в виде тепловой карты. Чем выше оценка (от 1 до 5), тем лучше контроллер соответствует требованиям по каждому параметру. Siemens S7-1200 выделяется как наиболее сбалансированный по всем критериям.

Выбранная для реализации проекта серия программно-логистических контроллеров (ПЛК) S7-1200 идеально подходит для решения задач по автоматизации управления водными ресурсами. Среди ее преимуществ можно выделить небольшие размеры, доступную цену и широкий набор команд. Контроллер S7-1200 и программные средства, работающие на базе Windows, гарантируют адаптируемость решений по управлению водными ресурсами. Кроме того, этот контроллер способен обрабатывать как аналоговые, так и дискретные сигналы, поэтому является предпочтительным вариантом для автоматизации процесса управления расходами воды при помощи расходомера (рисунок 5).

Программирование контроллера осуществляется с помощью программного обеспечения TIA Portal (Totally Integrated Automation Portal), которое позволяет создавать гибкие и эффективные алгоритмы управления. Программное обеспечение, включающее разработку проекта для контроллера и устройств распределённого ввода-вывода, настройку интерфейса взаимодействия человека и машины, параметризацию сетевых элементов и модулей коммуникации, отладку



Рисунок 4 – Визуальное сравнение технических характеристик контроллеров для систем управления расходом воды
 Figure 4 - Visual comparison of technical characteristics of controllers for water flow control systems

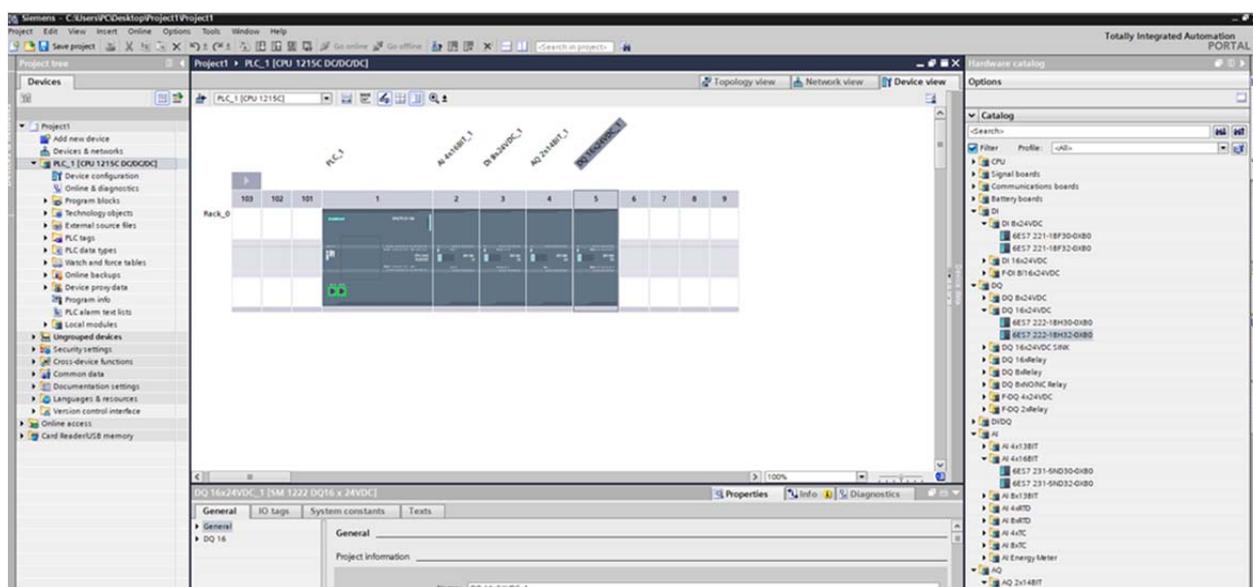


Рисунок 5 – Аналоговые и дискретные модули
 Figure 5 – Analogue and discrete modules

управляющих алгоритмов, а также пусконаладку приводов, обладает единой структурой и унифицированным пользовательским интерфейсом. Это ускоряет не только рабочий процесс, но и способствует созданию прозрачных решений, обслуживанию и диагностике которых легко обучиться.

Во главу угла продукта TIA Portal поставлена простота использования продукта (Usability). Принципиально новый пользовательский интерфейс призван облегчить работу с платформой, а его унификация и стандартизация упрощают работу с разнообразным оборудованием. Это новое слово в разработке программного обеспечения. Основной упор сделан на наглядность, интуитивную понятность и отсутствие многократно вложенных структур.

Одной из ключевых задач, которую предстояло решить, было масштабирование (преобразование) аналогового сигнала, поступающего от расходомера, в реальные значения расхода воды (рисунок 6).

Аналоговый сигнал от датчиков уровня и расходомеров 4–20 мА требует преобразования в физические единицы измерения для дальнейшего применения в алгоритмах регулирования. Преобразование осуществляется с использованием стандартной линейной формулы масштабирования, общепринятой в системах автоматизации:

$$Q = \left(\frac{(V_{\text{аналог}} - V_{\text{min}}) \cdot (Q_{\text{max}} - Q_{\text{min}})}{(V_{\text{max}} - V_{\text{min}}) + Q_{\text{min}}} \right), \quad (1)$$

где $V_{\text{аналог}}$ – текущее значение аналогового сигнала, полученного от расходомера; V_{min} и V_{max} – минимальные и максимальные значения сигнала (в данном случае 4 и 20 мА соответственно); Q_{min} и Q_{max} – минимальные и максимальные значения расхода воды, которые устанавливаются в зависимости от характеристик оросительной системы.

Эта формула описана в руководствах по промышленным контроллерам и применяется в широком спектре задач. В рамках проекта разработан программный блок масштабирования, реализованный в среде ПИА Portal. Он допускает параметризацию границ, фильтрацию шумов, диагностику обрыва/перегрузки сигнала и прямую интеграцию с блоками ПИД-регуляции.

Применение формулы (1) позволяет корректно преобразовать сигнал и учитывать его при управлении затвором. Для реализации данного функционала в ПИА Portal был создан блок, отвечающий за масштабирование. В этом блоке аналоговый сигнал, поступающий от расходомера, преобразуется в величину, соответствующую реальному расходу воды. Программирование этого блока требует предельной точности, так как ошибки в параметрах системы напрямую влияют на регулирование затвора и могут привести к его неправильной работе.

Управление затвором осуществляется на основе специализированного алгоритма, принимающего во внимание текущий расход воды, заданные пользователем пределы (минимальный и максимальный), а также ряд дополнительных условий. При превышении установленных лимитов расхода затвор автоматически закрывается, предотвращая перерасход, в случае недостаточного расхода затвор открывается, увеличивая подачу. Этот алгоритм обеспечивает точное регулирование расхода воды и способствует оптимизации использования водных ресурсов в ирригационных системах.

Главной задачей была разработка алгоритмов управления затвором. Для достижения этой цели был внедрен ПИД-регулятор, который обеспечивает автоматическое управление открыванием и закрыванием затвора на основании данных о расходе воды, поступающей от расходомера.

Использование ПИД-регуляторов в задачах автоматизации является широко распространённым подходом, однако в контексте работы с низкодебитными оросительными каналами возникают специфические требования:

- значительная инерционность отклика системы;
- наличие турбулентных и стохастических колебаний уровня;
- задержки сигнала и слабая динамика регулирования;
- необходимость трёхпозиционного управления приводом (вперёд/назад/стоп).

Для реализации ПИД-регулятора использовалась инструкция PID_3Step в среде программирования ПИА Portal. Этот регулятор был выбран за его способность эффективно управлять системами с интегрирующим поведением, что особенно важно для управления гидротехническими затворами и клапанами. Инструкция PID_3Step позволяет управлять клапаном по аналоговому сигналу, корректируя его положение в зависимости от изменений параметров потока воды (рисунок 8).

Описание ПИД-алгоритма и его реализация. Алгоритм ПИД-регулятора PID_3Step основан на классической схеме ПИД-регулирования, где используются три составляющие: пропорциональная (P), интегральная (I) и дифференциальная (D) (рисунок 9) [15].

При этом мы должны учитывать свои условия проекта: типы сигналов, промежуток между открытием и закрытием гидротехнического затвора, корректировку переменных. Это обеспечивает точную реакцию системы на изменения параметров потока воды.

Для расчета ПИД-регулятора в структурированной (взвешенной) форме используют следующее уравнение [15]:

$$\Delta y = K_p \cdot s \cdot \left[(b \cdot w - x) + \frac{1}{T_i \cdot s} (w - x) + \frac{T_D \cdot s}{a \cdot T_D \cdot s + 1} (c \cdot w - x) \right], \quad (2)$$

где Δy – выходное значение ПИД-алгоритма; K_p – пропорциональный коэффициент усиления; s – оператор Лапласа; b – взвешивание пропорционального воздействия; w – уставка; x – значение процесса; T_I – интегральное время действия; a – коэффициент производной задержки ($T_I = a \times T_D$); T_D – время производного действия; c – весовой коэффициент производного действия.

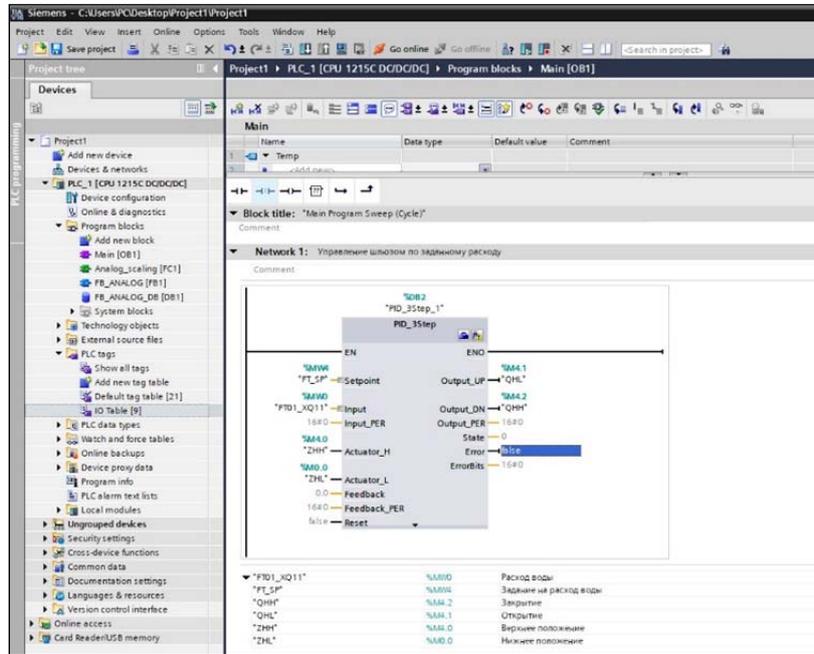


Рисунок 8 – Блок управления затвором

Figure 8 – Shutter control unit

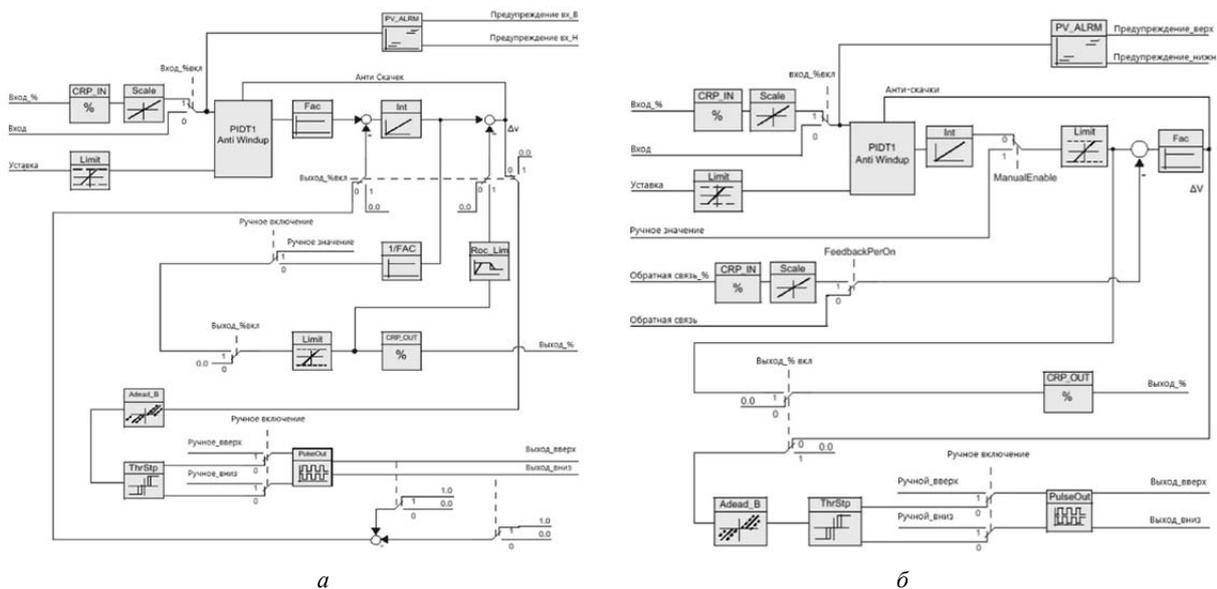


Рисунок 9 – Блок-схема по положению [15]: а – без обратной связи; б – с обратной связью

Figure 9 – Block diagram by position [15]: a – without feedback; b – with feedback

Уравнение для расчета выходного значения регулятора выглядит следующим образом [15]:

$$u(t) = K_p \cdot \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \right), \quad (3)$$

где $u(t)$ – управляющее воздействие, устанавливающее степень открытия затвора; $e(t)$ – ошибка, определяемая как разница между заданным и текущим значением расхода воды; K_p – коэффициент пропорциональной составляющей; T_i – время интегрирования, влияющее на накопление ошибки; T_d – время дифференцирования, учитывающее скорость изменения ошибки.

Методика настройки ПИД-регулятора для системы автоматического регулирования расхода воды в оросительных каналах. Настройка ПИД-регулятора является одним из ключевых этапов внедрения систем автоматического управления расходом воды в оросительных каналах. Представлена подробная методика настройки регулятора, включая теоретическое обоснование, выбор коэффициентов, поэтапную настройку, а также примеры применения. Цель настройки – достижение устойчивой, точной и адаптивной работы системы в условиях изменяющихся параметров среды и расхода воды.

Основу управления составляет ПИД-регулятор, формирующий управляющее воздействие на основе пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих ошибки регулирования. Ошибка $e(t)$ определяется как разность между уставкой и текущим значением расхода. Регулирующее воздействие $u(t)$ рассчитывается по формуле

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int e(t) dt + K_p \cdot T_d \cdot \frac{de(t)}{dt}, \quad (4)$$

где K_p – коэффициент пропорционального усиления; T_i – интегральное время; T_d – дифференциальное время.

Каждый из параметров влияет на поведение системы: K_p отвечает за амплитуду отклика, T_i – за устранение статической ошибки, а T_d – за предиктивное поведение и подавление колебаний.

Этапы настройки ПИД-регулятора. Настройка начинается с подготовки системы: проверяется подключение датчиков, корректность масштабирования сигналов и вводятся начальные уставки. Далее реализуются три последовательных этапа настройки:

1. Предварительная настройка. Задаются базовые коэффициенты K_p , T_i , T_d . Обычно берут $K_p=2$, $T_i=10$ с, $T_d=2$ с.

2. Тонкая настройка. Производится в условиях работы системы. При недостаточной точности или колебаниях вносятся корректировки.

3. Верификация. Выполняется проверка поведения системы в типичных эксплуатационных сценариях, включая сброс уставки, аварийное отключение и пр.

Каждый этап сопровождается логированием отклика системы и при необходимости переходом в безопасный режим.

Рассмотрим ситуацию, при которой заданное значение расхода воды составляет $w(t)=100$ м³/ч, а фактически измеренный расход – $x(t)=90$ м³/ч. Таким образом, ошибка регулирования определяется как

$$e(t) = w(t) - x(t) = 100 - 90 = 10 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Если предположить, что параметры ПИД-регулятора заданы следующим образом: $K_p=2$ – пропорциональный коэффициент; $T_i=10$ с – интегральное время; $T_d=2$ с – дифференциальное время.

Найдем каждую из составляющих управляющего воздействия $u(t)$:

1. Пропорциональная составляющая (P):

$$P = K_p \cdot e(t) = 2 \cdot 10 = 20.$$

2. Интегральная составляющая (I):

допустим, ошибка сохранялась на уровне 10 м³/ч в течение 10 с:

$$I = \frac{K_p}{T_i} \int e(t) dt = \frac{2}{10} \cdot (10 \cdot 10) = 20.$$

3. Дифференциальная составляющая (D):

предположим, скорость изменения ошибки 2 м³/ч в 1 с:

$$D = K_p \cdot T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} = 2 \cdot 2 \cdot 1 = 4.$$

Итоговое управляющее воздействие будет равно

$$u(t) = P + I + D = 20 + 20 + 4 = 44.$$

Это значение $u(t)$ подаётся на исполнительный механизм и определяет, насколько сильно следует изменить положение затвора для достижения желаемого расхода.

Допустим, заданный расход воды составляет $100 \text{ м}^3/\text{ч}$, а фактический измеренный – $90 \text{ м}^3/\text{ч}$. Тогда ошибка регулирования равна

$$e(t) = 100 - 90 = 10 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

При параметрах $K_p=2$, $T_i=10 \text{ с}$, $T_d=2 \text{ с}$ получим:

$$P = 2 \cdot 10 = 20;$$

$$I \approx (2/10) \cdot \int 10 dt \approx 20 \text{ (за условные } 10 \text{ с)};$$

$$D \approx 2 \cdot (d10/dt) \approx 4 \text{ (при изменении расхода } 2 \text{ м}^3/\text{ч за } 1 \text{ с)};$$

$u(t) = 20 + 20 + 4 = 44$ – итоговое значение управляющего воздействия, направленного на привод заслонки.

Настройка ПИД-регулятора является итеративным и чувствительным к параметрам процесса этапом. Представленная методика предусматривает пошаговый подход, позволяющий обеспечить высокую точность регулирования расхода воды, устойчивость работы и быструю адаптацию к внешним возмущениям. Полученные результаты могут служить основой для масштабирования системы на другие объекты мелиоративной инфраструктуры. Будущие исследования будут направлены на интеграцию искусственного интеллекта и предиктивных моделей в процесс настройки.

Особенности настройки в реальных условиях. Реальные условия эксплуатации оросительных каналов характеризуются рядом факторов, которые необходимо учитывать при внедрении ПИД-регулирования:

- наличие гидравлических колебаний и турбулентностей потока;
- инерционность механических исполнительных устройств;
- вариативность параметров окружающей среды (температура, загрязнение воды);
- непостоянство энергетического снабжения (особенно в автономных системах с солнечными панелями).

Настройка регулятора должна учитывать не только идеальные условия моделирования, но и практическую ограниченность возможностей датчиков, привода и вычислительной мощности ПЛК.

Пропорциональный коэффициент (K_p) определяет, насколько быстро система будет реагировать на отклонение от уставки. Однако слишком высокое значение может привести к перерегулированию, что в условиях водоснабжения чревато перерасходом ресурса или механическими нагрузками на заслонку.

Интегральное время (T_i) определяет, с какой скоростью будет накапливаться ошибка. Это важно для устранения постоянного смещения между заданным и реальным расходом. Если T_i слишком мало – возможна неустойчивость; слишком большое – система будет долго реагировать.

Дифференциальное время (T_d) используется для упреждения изменений. Оно полезно при быстрых колебаниях потока, но может вызывать чувствительность к шумам. В системах с высокоинерционным откликом T_d может быть снижено до минимума или вообще отключено.

Практический алгоритм настройки. Настройка производится итерационно. Один из проверенных методов – Ziegler-Nichols, адаптированный под характеристики систем водораспределения:

1. Выставить T_i и T_d в бесконечность (или отключить I и D части).
2. Увеличивать K_p до тех пор, пока система не начнёт осциллировать (установить предельный K_p).
3. Записать критический коэффициент усиления $K_{кр}$ и период колебаний $T_{кр}$.

Этот метод даёт хорошие стартовые значения, которые затем уточняются эмпирически. При необходимости можно применять более «мягкие» методы, например метод Кона-Коэна или программную автонастройку, реализуемую в современных ПЛК (в частности, Siemens S7-1200 поддерживает адаптивную настройку PID_Compact).

Настройка и реализация в TIA Portal. В среде TIA Portal доступны два способа реализации ПИД-регуляторов:

- PID_Compact – удобный модуль для большинства задач, позволяет задать лимиты, фильтрацию и автонастройку;
- PID_3Step используется для управления электроприводами, имеющими три дискретных состояния (вперёд, назад, стоп), подходит для управления заслонками.

Процесс настройки включает:

- создание блока PID;
- привязку аналоговых сигналов к входам (уставка, измеренное значение);
- задание коэффициентов;
- симуляцию и ввод в эксплуатацию.

При реализации алгоритмов управления в среде TIA Portal разработан блок программы, отвечающий за настройку ПИД-регулятора. Этот блок включает функции настройки параметров K_p , T_i и T_d , а также логику управления затвором в зависимости от показаний расходомера (рисунок 10).

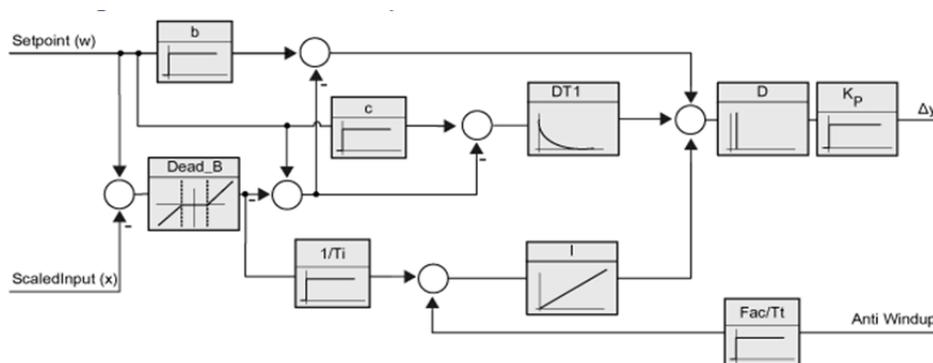


Рисунок 10 – Блок-схема ПИД T1 с антивинтажом [15]

Figure 10 – Block diagram of PID T1 with anti-vintage [15]

Программа управления предусматривает несколько режимов: автоматический, ручной, предварительная и тонкая настройка, а также функции диагностики и обработки ошибок. В случае выхода параметров за допустимые пределы система переводится в безопасный режим с закрытием затвора.

Разработанная архитектура имеет модульную структуру и может быть масштабирована под различные конфигурации оросительных систем. С учетом простоты оборудования и программной реализации, это решение может быть применено в условиях ограниченного финансирования, особенно в сельскохозяйственных регионах, где отсутствует доступ к высокотехнологичным системам управления.

Обработка сбоев и обеспечение надёжности. Одним из важнейших требований к оросительным системам является устойчивость к аварийным режимам. ПИД-регулятор должен быть снабжён следующими защитами:

- переход в неактивный режим при потере сигнала от датчиков;
- ограничение скорости изменения управляющего сигнала;
- ограничение диапазона регулирования;
- диагностика запаздывания сигнала или «зависания» значения;
- автоматическое закрытие заслонки при разряде аккумулятора ниже критического.

Все эти элементы могут быть реализованы в логике ПЛК и прописаны как условия на выход ПИД-регулятора или отдельные логические блоки.

Результаты. Большинство оросительных систем позволяет регулировать водный поток лишь в ограниченном технологическом диапазоне. Это обусловлено тем, что они не оснащены средствами для точного регулирования водораспределения, что приводит к длительному установившемуся режиму распределения воды потребителям.

Разработка алгоритмов была ориентирована на создание автоматизированной системы управления затвором, которая обеспечивала бы подачу заданных расходов и поддержание требуемых уровней воды, заданной поливной нормы с минимальным ее отклонением и равномерность полива. Для этого алгоритмы учитывают не только текущее значение расхода воды, но и динамику изменения этого параметра во времени. Это позволяет избежать резких изменений положения затвора и обеспечивать более стабильную работу системы.

Алгоритмы управления затвором. В основе разработанных алгоритмов лежит принцип динамического управления, при котором затвор открывается или закрывается в зависимости от текущего расхода воды и заданных условий.

Примерный порядок работы алгоритмов:

1. Получение данных о текущем расходе воды от расходомера.
2. Масштабирование аналогового сигнала для приведения его к физическим единицам.
3. Расчет ошибки $e(t)$ как разницы между заданным и текущим расходом.
4. Применение ПИД-алгоритма для вычисления корректирующего воздействия $u(t)$.
5. Управление затвором в зависимости от рассчитанного значения $u(t)$.
6. Мониторинг работы системы и передача данных оператору для контроля.

Пример расчета. Предположим, что текущий расход воды составляет $90 \text{ м}^3/\text{ч}$, а заданное значение – $100 \text{ м}^3/\text{ч}$. Тогда ошибка $e(t)$ равна

$$e(t) = 100 - 90 = 10 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Для этого случая коэффициенты ПИД-регулятора установлены следующим образом: $K_p=2$, $T_i=5 \text{ с}$, $T_d=1 \text{ с}$. Тогда пропорциональная составляющая P будет равна

$$P = 2 \cdot 10 = 20.$$

Интегральная составляющая за 5 с :

$$I = \frac{2}{5} \cdot \int_0^5 10 d\tau = 20.$$

Дифференциальная составляющая при скорости изменения расхода $2 \text{ м}^3/\text{ч}$ за 1 с :

$$D = 2 \cdot 1 \cdot 2 = 4.$$

Тогда итоговое значение $u(t)$ будет

$$u(t) = 20 + 20 + 4 = 44.$$

Это значение используется для управления затвором, увеличивая его открытие для достижения заданного расхода.

Написанные алгоритмы уже готовы к интеграции в реальную систему управления затвором с дальнейшим тестированием их в реальных условиях для проверки работоспособности и возможности внесения необходимых корректировок.

Разработанная автоматизированная система предназначена для регулирования расхода воды в оросительных каналах с малыми дебитами, обеспечивает высокую точность поддержания заданных гидравлических параметров. Система спроектирована как энергонезависимая и полностью автономная, что позволяет её эффективно применять в условиях удалённости от централизованных энергосетей.

В качестве источника питания используется фотоэлектрическая солнечная панель, подключённая к контроллеру заряда, который обеспечивает стабильное зарядание аккумулятора постоянного тока номинальным напряжением 24 В . Аккумулятор, в свою очередь, питает все элементы системы, включая программируемый логический контроллер (ПЛК), измерительные датчики, исполнительные механизмы и панель оператора (НМИ). Контроль за уровнем заряда и общим энергопотреблением осуществляется посредством соответствующих аналоговых каналов ПЛК.

Центральным управляющим элементом системы является контроллер Siemens S7-1200, программируемый в среде TIA Portal. Контроллер принимает входные сигналы от измерительных

устройств, обрабатывает их и на основании встроенного алгоритма ПИД-регулирования формирует управляющие команды, направленные на исполнительный привод, регулирующий положение гидротехнического затвора.

Измерительная подсистема включает в себя следующие элементы:

1. Гидростатический датчик, установленный вблизи водозабора, передаёт в ПЛК аналоговый сигнал (4–20 мА), соответствующий уровню воды. На основе уровня, согласно известным гидравлическим соотношениям, производится расчет текущего расхода.

2. Энкодер, установленный на приводе затвора, генерирует аналоговый сигнал, определяющий положение заслонки в процентах от полного открытия.

3. Концевые выключатели, дискретные устройства, фиксируют граничные положения затвора – полностью открытое и полностью закрытое. Эти сигналы используются для обеспечения безопасного функционирования системы.

4. Энергометр позволяет вести мониторинг общего энергопотребления и оценки эффективности автономного энергоснабжения.

Оператор взаимодействует с системой через сенсорную панель НМІ, посредством которой задаются уставки (например, желаемый расход воды в м³/ч), отображаются текущие параметры (уровень воды, положение заслонки, состояние аккумулятора), а также производится выбор режима работы: автоматический, ручной, диагностический или режим настройки.

После ввода уставки контроллер производит сравнение её с текущим значением расхода, определяет величину отклонения и запускает алгоритм ПИД-регулирования. Управляющее воздействие рассчитывается на основании пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих, после чего формируется команда на открытие или закрытие затвора через исполнительный привод. Направление вращения двигателя контролируется дискретными выходами ПЛК через соответствующие реле или контакторы. Реальное положение заслонки уточняется по сигналу энкодера, а при достижении крайних положений работа двигателя блокируется срабатыванием концевых выключателей.

Обсуждение. Автоматизированная система представляет собой интегрированное решение, объединяющее современные методы измерения, обработки данных и регулирования, при этом сохраняет простоту архитектуры и низкую энергоёмкость. Это делает её особенно эффективной для использования в сельскохозяйственных регионах, испытывающих дефицит водных ресурсов и ограниченный доступ к технической инфраструктуре.

Масштабирование реализовано через линейную интерполяцию с учетом характеристик канала и допустимых диапазонов измерения. Управляющее воздействие формируется на основе ПИД-регулятора, реализованного с помощью инструкции PID_3Step. Такая структура управления обеспечивает плавное и устойчивое регулирование положения затвора. Параметры ПИД-регулятора подбираются с учетом инерционности системы и необходимости исключения резких колебаний уровня воды.

Для более гибкой настройки и управления затвором были предусмотрены следующие режимы работы регулятора, которые закладываются в алгоритмы управления:

– неактивный режим – система управления затвором отключена, что позволяет проводить техническое обслуживание или конфигурацию системы без активного вмешательства в работу затвора;

– предварительная настройка – используется для начальной калибровки регулятора, когда требуется задать базовые параметры управления для достижения стабильной работы системы;

– тонкая настройка – более детализированная настройка параметров регулятора после первичной настройки для повышения точности и эффективности управления затвором;

– автоматический режим – основной режим работы ПИД-регулятора, при котором система автоматически корректирует положение затвора в зависимости от текущих значений расхода воды и заданных параметров;

– ручной режим – позволяет оператору вручную управлять положением затвора для проведения испытаний или корректировок;

– мониторинг ошибки и диагностика – предназначены для отслеживания ошибок в работе системы и подачи соответствующих сигналов оператору в случае возникновения проблем.

Заключение. Для точного и эффективного управления водными ресурсами в оросительных каналах необходима автоматизация процесса регулирования расхода воды. Ключевым элементом такой автоматизации является разработка алгоритмов управления затворами на основе ПИД-регулятора.

На текущем этапе разработки системы управления гидротехническим затвором достигнуты существенные результаты, в том числе разработан и успешно протестирован блок масштабирования аналогового сигнала. Этот блок позволяет с высокой точностью определять расход воды, что критически важно для оптимального управления. В перспективе планируется добавление новых функций и улучшений, направленных на повышение эффективности использования водных ресурсов и автоматизацию процессов водораспределения.

Разработанная система управления гидротехническим затвором предназначена для автоматизации оросительных каналов, что позволит более эффективно оптимизировать водопользование в сельском хозяйстве. Планируемое расширение возможностей системы включает в себя использование дополнительных датчиков и более сложных алгоритмов управления, что позволит сделать процесс управления водными ресурсами еще более точным и эффективным.

Финансирование. Научно-исследовательские работы выполнены при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP23488125).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бочкарев В. Я., Бочкарев Я. В. Автоматизация водораспределения на каналах оросительных систем равнинной зоны методом непосредственного отбора расходов // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2013. – № 1(09). – С. 32-41.
- [2] Овчинников А. С., Киселёва Р. З., Мелихов К. М., Киселёв А. А. Автоматические регуляторы для оснащения гидротехнических сооружений при орошении риса // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2022. – № 1(65). – С. 342-351. – <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2022-01-33>
- [3] Пахомов А. А., Колобанова Н. А. Автоматизированное управление процессом водоподачи с использованием гидравлических средств регулирования // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2013. – № 4(12). – С. 168-178.
- [4] Эргашев С. Ф., Рустамов У. С., Абдурахмонов С. М., Кулдашов О. Х. Автоматизированная система управления водными ресурсами на основе элементов компьютерной автоматизации // Автоматика и программная инженерия. – 2020. – № 3(33). – С. 11-15.
- [5] Anand Santosh, Nath Adithya, Jayan Aparna & Brunda I. B., Brunda.I. B., Vidyashree C. C. // Automatic Water Management System. Conference: Proceedings of the FIST International Conference on Advanced Scientific Innovation in Science, Engineering and Technology, ICASISSET 2020, 16-17 May 2020, Chennai, India. – <https://doi.org/10.4108/eai.16-5-2020.2303936>
- [6] Majid A., Jamaaluddin, Wiguna A., Setiawan H., Fariyah A. Development of an Automatic Water Flow Sensor System Using ESP32 for Efficient Water Control // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 1242(2023). – P. 1-9. – <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1242/1/012016>
- [7] Naika Ramesha Water management in rural communities: a step towards achieving sustainability By 2030 // Sustainable Water Resources Management. – August 2022. – No. 8(4). – <https://doi.org/10.1007/s40899-022-00702-4>
- [8] Nakib Arman Mohammad, Barua Badhon Aqua flow master: intelligent liquid flow control and monitoring system // International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science. – June 2024. – No. 6(4). – P. 2582-5208. – <https://doi.org/10.56726/IRJMETS53697>
- [9] Patil Smita, Tasgaonkar Pankaj, Sonawane D. N., Deshpande Amruta. Development of a System for Low Flow Control with a Proportional Solenoid Valve // Conference: 2024 5th International Conference on Circuits, Control, Communication and Computing (I4C). – October 2024. – <https://doi.org/10.1109/I4C62240.2024.10748531>
- [10] Shatabdi Basu, Afaq Ahmed, Hitarth Pareek, Dr. Pradeep Kumar Sharma Autonomous Water Flow Control And Monitoring System // Conference: 2022 Interdisciplinary Research in Technology and Management (IRTM) February 2022. – <https://doi.org/10.1109/IRTM54583.2022.9791534>
- [11] Senthilkumar R., Santhoshkumar L., Ayyappan M., Amarnath M., Jayanthi P. (2025). An Automatic Motor Control System for Smart Irrigation // Computing Technologies for Sustainable Development. IRCCTSD 2024. Communications in Computer and Information Science. Springer, Cham. – Vol. 2360. – P. 112-121. – <https://doi.org/10.1007/978-3-031-82389-310>
- [12] Биленко В. А., Иванова Н. И., Фролова Г. П., Аскаралиев Б. О. Автоматизация водораспределения в низовом звене оросительных систем предгорной зоны способом непосредственного отбора // Природообустройство. – 2009. – Вып. 1. – С. 62-67.
- [13] Liu F., Yu X., Tang J. Water-saving control system based on multiple intelligent algorithms. Auton. // Intell. Syst. – 4, 13 (2024). – <https://doi.org/10.1007/s43684-024-00068-8>.
- [14] SIMATIC S7-1200, S7-1500 PID-регулятор / Руководство пользователя. – 2016. – 523 с.
- [15] Siemens. SiePortal [Электрон. ресурс]. – 2014. – URL: <https://support.industry.siemens.com/cs/mdm/109054417?c=45381018379&lc=ru-KZ> (дата обращения 2025.04.30).

REFERENCES

- [1] Bochkarev V. Ya., Bochkarev Ya. V. Automation of water distribution on canals of irrigation systems in the flat zone by the method of direct selection of flows // Scientific journal of the Russian Research Institute of Land Reclamation Problems. 2013. No. 1 (09). P. 32-41 (in Russ.).
- [2] Ovchinnikov A. S., Kiseleva R. Z., Melikhov K. M., Kiselev A. A. Automatic regulators for equipping hydraulic structures for rice irrigation // News of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education. 2022. No. 1(65). P. 342-351. <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2022-01-33> (in Russ.).
- [3] Pakhomov A. A., Kolobanova N. A. Automated control of the water supply process using hydraulic control means // Scientific journal of the Russian Research Institute of Land Reclamation Problems. 2013. No. 4(12). P. 168-178 (in Russ.).
- [4] Ergashev S.F., Rustamov U.S., Abdurakhmanov S.M., Kuldashov O.Kh. Automated water resources management system based on computer automation elements // Automation and software engineering. 2020. No. 3(33). P. 11-15 (in Russ.).
- [5] Anand Santosh, Nath Adithya, Jayan Aparna & Brunda I.B., Brunda I.B., Vidyashree C. C. // Automatic Water Management System. Conference: Proceedings of the First International Conference on Advanced Scientific Innovation in Science, Engineering and Technology, ICASSET 2020, 16-17 May 2020, Chennai, India. <https://doi.org/10.4108/eai.16-5-2020.2303936>
- [6] Majid A., Jamaaluddin, Wiguna A., Setiawan H., Fariyah A. Development of an Automatic Water Flow Sensor System Using ESP32 for Efficient Water Control // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 1242(2023). P. 1-9. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1242/1/012016>
- [7] Naika Ramesha Water management in rural communities: a step towards achieving sustainability By 2030 // Sustainable Water Resources Management. August 2022. No. 8(4). <https://doi.org/10.1007/s40899-022-00702-4>
- [8] Nakib Arman Mohammad, Barua Badhon Aqua flow master: intelligent liquid flow control and monitoring system // International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science. June 2024. No. 6(4). P. 2582-5208. <https://doi.org/10.56726/IRJMETS53697>
- [9] Patil Smita, Tasgaonkar Pankaj, Sonawane D. N., Deshpande Amruta Development of a System for Low Flow Control with a Proportional Solenoid Valve // Conference: 2024 5th International Conference on Circuits, Control, Communication and Computing (I4C). October 2024. <https://doi.org/10.1109/I4C62240.2024.10748531>
- [10] Shatabdi Basu, Afaq Ahmed, Hitarth Pareek, Dr. Pradeep Kumar Sharma Autonomous Water Flow Control And Monitoring System // Conference: 2022 Interdisciplinary Research in Technology and Management (IRTM) February 2022. <https://doi.org/10.1109/IRTM54583.2022.9791534>
- [11] Senthilkumar R., Santhoshkumar L., Ayyappan M., Amarnath M., Jayanthi P. (2025). An Automatic Motor Control System for Smart Irrigation // Computing Technologies for Sustainable Development. IRCCTSD 2024. Communications in Computer and Information Science. Springer, Cham. Vol. 2360. P. 112-121. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-82389-310>
- [12] Bilenko V. A., Ivanova N. I., Frolova G. P., Askaraliev B. O. Automation of water distribution in the lower link of irrigation systems in the foothill zone by the method of direct selection // Nature management. 2009. Issue 1. P. 62-67 (in Russ.).
- [13] Liu F., Yu X., Tang J. Water-saving control system based on multiple intelligent algorithms. Auton // Intell. Syst. 4, 13 (2024). <https://doi.org/10.1007/s43684-024-00068-8>
- [14] SIMATIC S7-1200, S7-1500 PID controller / User's Guide. 2016. 523 p.
- [15] Siemens. SiePortal [Electronic resource]. 2014. URL: <https://support.industry.siemens.com/cs/mdm/109054417?c=45381018379&lc=ru-KZ> (date of access 2025.04.30).

М. А. Ли¹, Т. Қ. Иманалиев², Е. С. Тұрғынбеков^{*3}, Т. Т. Ибраев⁴, Н. Н. Балғабаяев⁵

¹Т.ғ.к., «Суға сұранысты басқару» зертханасының басшысы

(«География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; limarina76@mail.ru)

²«Су ресурстарын басқару» бөлімінің меңгерушісі («Қазақ су шаруашылығы ғылыми-зерттеу институты» ЖШС, Тараз, Қазақстан; tonimontana_777@mail.ru)

^{3*}PhD докторанты, «Автоматика және телекоммуникация» кафедрасының аға оқытушысы (М.Х. Дулати атындағы Тараз университеті, Тараз, Қазақстан; Bosik_90@mail.ru)

⁴Т.ғ.к., жетекші ғылыми қызметкер («География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; kiwr-t@mail.ru)

⁵Бас директорының м.а. («Қазақ су шаруашылығы ғылыми-зерттеу институты» ЖШС, Тараз, Қазақстан; balgabayev@mail.kz)

**ТӨМЕН АҒЫМДЫ СУАРУ КАНАЛДАРЫНДА СУ АҒЫМЫН БАСҚАРУДЫҢ
АВТОМАТТАНДЫРЫЛҒАН ЖҮЙЕСІН ҚҰРУ**

Аннотация. Су ресурстарын басқарудың және суару каналдарын пайдаланудың тиімділігін арттыру оларға суды бақылауды, есепке алуды және бөлуді автоматтандырумен тікелей байланысты, бұл осы саладағы түйінді басымдық болып табылады. Табиғи ылғалдануы жеткіліксіз аймақтарда суару үшін сумен қамтамасыз ету проблемасы, әсіресе шығыны аз каналдарда суару желілерін тиісінше пайдаланудың болмауынан шиеленісе түседі. Аз шығынмен суару каналдарында су бөлуді басқарудың автоматтандырылған

жүйесін құру мақсатында гидротехникалық бекітпені басқару алгоритмдері әзірленді. Шығын өлшегіштен түсетін су шығыны туралы деректер негізінде қақпақты ашу мен жабуды автоматты басқаруды қамтамасыз ететін пропорционалды-интегралды-саралаушы реттегішті енгізу ұсынылды.

Түйін сөздер: автоматтандыру, алгоритм, гидротехникалық қақпақ, суару арнасы, шығыс, реттеу, басқару.

M. A. Li¹, T. K. Imanaliyev², Ye. S. Turgynbekov^{*3}, T. T. Ibrayev⁴, N. N. Balgabayev⁵

¹ Candidate of Technical Sciences, Head of the Water Demand Management Laboratory
(Institute of Geography and Water Security JSC, Almaty, Kazakhstan; limarina76@mail.ru)

² Head of Water Resources Management Department (Kazakh Research Institute of Water Management LLP,
Taraz, Kazakhstan; tonimontana_777@mail.ru)

^{3*} PhD doctoral student, senior lecturer at the Department of Automation and Telecommunications
(Taraz University named after M.Kh. Dulati, Taraz, Kazakhstan; Bosik_90@mail.ru)

⁴ PhD, Leading Researcher (Institute of Geography and Water Security JSC, Almaty, Kazakhstan; kiwr-t@mail.ru;

⁵ Acting General Director (Kazakh Research Institute of Water Management LLP,
Taraz, Kazakhstan; balgabayev@mail.kz)

DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED WATER FLOW CONTROL SYSTEM FOR LOW-DISCHARGE IRRIGATION CANALS

Abstract. Improving the efficiency of water management and the operation of irrigation canals is directly related to the automation of control, accounting and distribution of water on them, which is a key priority in this area. The problem of providing water for irrigation in areas with insufficient natural moisture is aggravated by the lack of proper operation of irrigation networks, especially on channels with low flow rates. In order to create an automated water distribution control system on irrigation channels with low flow rates, algorithms for controlling a hydraulic gate have been developed. It is proposed to implement a PID controller that provides automatic control of the opening and closing of the shutter based on water flow data from the flowmeter.

Keywords: automation, algorithm, hydraulic gate, irrigation channel, flow rate, regulation, control.