

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО,
ГИДРАВЛИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 626.824

doi: 10.31774/2712-9357-2023-13-4-362-384

Анализ возможности проектирования системы автоматического управления технологическим процессом водораспределения с использованием ПИД-регуляторов при управлении по верхнему бьефу в Донском магистральном канале

Александр Александрович Ткачев¹, Александр Михайлович Анохин², Игорь Геннадьевич Литуновский³, Дмитрий Андреевич Симончук⁴

^{1, 2, 3, 4}Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт имени А. К. Кортунова – филиал Донского государственного аграрного университета, Новочеркасск, Российская Федерация

¹prof_al@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8060-620X>

²anocxin2014@yandex.ru

³gts_i_sm.nimi@mail.ru

⁴gts_i_sm.nimi@mail.ru

Аннотация. Цель: анализ вопросов разработки и применения системы автоматического управления технологическим процессом водораспределения в Донском магистральном канале (ДМК) с использованием ПИД-регуляторов и схемы управления по верхнему бьефу. Актуальность указанной цели обосновывается тем, что эффективное управление уровнем воды в канале имеет большое значение для сельскохозяйственного производства и обеспечения водой прилегающих территорий. В статье проводится анализ основных компонентов системы управления, включая ПИД-регуляторы, схему управления по верхнему бьефу. Рассматривается возможность применения данных компонентов для эффективного контроля и регулирования уровня воды в канале. **Материалы и методы.** Выполнен подробный анализ факторов, которые необходимо учитывать при проектировании системы автоматического управления водой в канале с использованием ПИД-регуляторов. Предложен алгоритм управления уровнем воды в канале по верхнему бьефу с использованием ПИД-регуляторов. **Результаты.** Предложены мероприятия по разработке и внедрению системы управления водораспределением в ДМК. Указывается, что при проектировании системы управления следует учитывать конфигурацию канала и принимать меры для обеспечения равномерного распределения воды по всей его длине с учетом неустановившегося движения воды в ДМК. Результаты анализа показывают, что система автоматического управления с использованием ПИД-регуляторов и схемы управления по верхнему бьефу имеет потенциал для эффективного управления уровнем воды в ДМК. **Выводы.** На основе проведенного анализа сделан вывод о возможности успешного проектирования системы автоматического управления водой в ДМК с использованием ПИД-регуляторов и схемы управления по верхнему бьефу. Дальнейшее исследование и разработка могут способствовать оптимизации управления водораспределением и повышению эффективности сельскохозяйственного производства в регионе.

Ключевые слова: управление водораспределением, магистральный канал, управление по верхнему бьефу, ПИД-регуляторы, автоматическое управление, сельскохозяйственное производство



Для цитирования: Анализ возможности проектирования системы автоматического управления технологическим процессом водораспределения с использованием ПИД-регуляторов при управлении по верхнему бьефу в Донском магистральном канале / А. А. Ткачев, А. М. Анохин, И. Г. Литуновский, Д. А. Симончук // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т. 13, № 4. С. 362–384. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-4-362-384>.

HYDRAULIC ENGINEERING,
HYDRAULICS AND ENGINEERING HYDROLOGY

Original article

**Opportunity analysis of designing an automatic control system
for the technological process of water distribution using
PID controllers in upstream control in the Donskoy main channel**

**Alexander A. Tkachev¹, Alexander M. Anokhin², Igor G. Litunovsky³,
Dmitry A. Simonchuk⁴**

^{1, 2, 3, 4}Novocherkassk Engineering and Land Reclamation Institute – branch of the Don State Agrarian University, Novocherkassk, Russian Federation

¹prof_al@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8060-620X>

²anocxin2014@yandex.ru

³gts_i_sm.nimi@mail.ru

⁴gts_i_sm.nimi@mail.ru

Abstract. Purpose: to analyze the issues of development and application of an automatic control system for the technological process of water distribution in the Donskoy main channel (DMC) using proportional-integral differential PID controllers and a control scheme for the upstream. The urgency of this purpose is justified by the fact that effective management of water level in channel is of great importance for agricultural production and water supply to adjacent territories. The analysis of the main components of the control system, including PID controllers and the upstream control scheme is performed. The possibility of using these components for effective control and regulation of water level in the channel is considered. **Materials and methods.** A detailed analysis of the factors that must be taken into account when designing an automatic control system of water in a channel using PID controllers has been carried out. An algorithm for controlling water level in the upstream channel using PID controllers is proposed. **Results.** Measures for the water distribution management system development and implementation in the Donskoy main channel are proposed. It is stated that when designing a control system, the configuration of the channel and the measures to ensure a uniform distribution of water along its entire length should be taken into account, considering the unsteady water motion in the Donskoy main channel. The results of the analysis show that the automatic control system using PID controllers and the upstream control scheme has the potential to control the water level in the DMC effectively. **Conclusions.** Based on the analysis carried out, it was concluded that it is possible to design an automatic water control system in the DMC using PID controllers and a control scheme for the upstream successfully. Further research and development can contribute to the optimization of water distribution management and increase the efficiency of agricultural production in the region.

Keywords: water distribution control, main channel, upstream control, proportional-integral differential PID controllers, automatic control, agricultural production

For citation: Tkachev A. A., Anokhin A. M., Litunovsky I. G., Simonchuk D. A. Opportunity analysis of designing an automatic control system for the technological process of water distribution using PID controllers in upstream control in the Donskoy main channel. *Land*

Reclamation and Hydraulic Engineering. 2023;13(4):362–384. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-4-362-384>.

Введение. Для автоматизации управления технологическим процессом водораспределения в канале используются специализированные системы управления, которые обычно состоят из аппаратного и программного обеспечения [1, 2]. Аппаратное обеспечение может включать в себя датчики, контроллеры, насосы, задвижки и другое оборудование, которое контролирует и регулирует поток воды в канале. Программное обеспечение может быть разработано для контроля и управления различными аспектами системы, такими как регулирование потока воды, контроль ее качества, мониторинг состояния окружающей среды, управление электроэнергией и т. д.

Системы управления могут быть настроены для автоматического выполнения ряда задач, таких как автоматический контроль уровня воды в канале, контроль скорости потока, управление задвижками и насосами, а также для обработки и анализа данных, собранных датчиками.

Существуют различные типы систем управления технологическим процессом водораспределения в каналах, которые могут быть разработаны в зависимости от специфических потребностей конкретного канала. Например, системы управления могут быть спроектированы для контроля уровня воды, осушения канала, управления паводковым режимом и т. д.

Системы управления технологическим процессом водораспределения в каналах имеют ряд преимуществ, таких как повышение эффективности управления водой, уменьшение потерь воды, снижение затрат на обслуживание и уменьшение воздействия на окружающую среду. Однако для разработки и внедрения такой системы требуется определенный уровень знаний и навыков, а также инвестиции в оборудование и разработку программного обеспечения.

При выборе системы управления необходимо учитывать ряд факто-

ров, таких как местные климатические условия, особенности территории, тип и объем канала, а также требования к управлению водой.

Для разработки системы управления необходимо произвести детальный анализ технических и экономических аспектов проекта, включая оценку существующего оборудования и возможности его использования, определение необходимости добавления нового оборудования и соответствующей инфраструктуры [3].

Кроме того, при проектировании системы управления необходимо учитывать потенциальные риски, связанные с возможными отказами оборудования, потерями данных или нарушением производственного процесса. Для минимизации рисков необходимо предусмотреть меры по обеспечению безопасности системы, резервное копирование данных, мониторинг и контроль качества работы системы.

Особое внимание также следует уделить аспектам, связанным с безопасностью системы управления, таким как защита от несанкционированного доступа и хакерских атак. Для обеспечения безопасности можно использовать различные технологии и инструменты, такие как шифрование данных, авторизация, аутентификация и многие другие.

Поэтому целью исследований является анализ вопросов разработки и применения системы автоматического управления водой в Донском магистральном канале (ДМК) с использованием ПИД-регуляторов и схемы управления по верхнему бьефу.

Материалы и методы. При выборе системы управления технологическим процессом водораспределения в каналах можно использовать различные подходы. Рассмотрим некоторые из них.

Классический подход, основанный на ручном управлении: в этом случае управление водораспределением осуществляется вручную операторами на месте или из центра управления. Для этого могут использоваться различные инструменты и приборы, такие как датчики уровня воды, си-

системы заслонок и т. д. Этот подход может быть эффективен в случаях, когда объем воды невелик и операции по управлению водой не слишком сложны.

Автоматический подход, основанный на использовании программных систем управления: в этом случае управление водораспределением осуществляется автоматически с помощью компьютерных программ и специализированного оборудования. Для этого могут использоваться различные технологии, такие как системы дистанционного управления, системы управления пропускной способностью и т. д. Этот подход может быть эффективен в случаях, когда объем воды большой и операции по управлению водой довольно сложные [4].

Гибридный подход, основанный на сочетании классического и автоматического подходов: в этом случае управление осуществляется как вручную, так и автоматически в зависимости от обстановки и задач. Для этого используются различные технологии и инструменты, такие как системы автоматического управления, дополненные системами управления на месте и т. д. Этот подход может быть эффективен в случаях, когда требуется гибкость и возможность быстро реагировать на изменения обстановки.

Независимо от выбранного подхода, система управления водораспределением должна быть спроектирована таким образом, чтобы обеспечивать надежную и безопасную работу, а также максимальную эффективность процесса управления [5]. Для этого необходимо провести тщательный анализ требований и выбрать соответствующие технологии и оборудование. Кроме того, необходимо обеспечить надлежащую подготовку персонала, который будет управлять системой, и регулярное обслуживание и обновление системы.

Для проектирования системы автоматического управления технологическим процессом водораспределения в канале с использованием ПИД-регуляторов необходимо учитывать следующее:

- описание системы управления: необходимо описать цель системы управления, ее функциональность, требования к точности и стабильности управления, а также среду, в которой система будет работать.

Существует много инструментов и программных средств для проектирования систем автоматического управления с использованием ПИД-регуляторов [6]. Выбор конкретной среды зависит от конкретных требований и предпочтений разработчика;

- описание объекта управления: необходимо описать объект управления, т. е. канал, в котором будет осуществляться управление водой. Необходимо указать его параметры, такие как геометрические размеры, объем воды, скорость ее движения, параметры загрузки и т. д.

Кроме того, необходимо в зависимости от поставленных задач принимать во внимание: уклон канала, высоту дамб, существующие препятствия, направление течения воды; погодные условия: количество осадков, температуру воздуха, скорость ветра; физико-химические параметры воды: температуру, уровень рН, содержание солей и других веществ, которые могут повлиять на физические свойства воды и течение в канале;

- описание задачи управления: необходимо описать задачу управления, которая решается с помощью системы управления. Например, это может быть поддержание определенного уровня воды в канале, поддержание определенного расхода воды через канал и т. д.

Задача поддержания определенного уровня воды в канале может быть решена с помощью ПИД-регулятора, который будет управлять датчиком уровня воды и исполнительным механизмом для регулирования подачи воды в канал. Для этого необходимо определить заданное значение уровня воды и сравнивать его с текущим значением, полученным от датчика уровня. Если уровень воды выше заданного, то нужно уменьшить подачу воды, а если ниже заданного, то увеличить подачу [7].

Для решения задачи поддержания определенного уровня воды в ка-

нале при проектировании системы автоматического управления с использованием ПИД-регуляторов необходимо провести ряд измерений и определить следующие параметры:

- 1) начальный уровень воды в канале (например, при запуске системы);
- 2) желаемый уровень воды в канале;
- 3) максимальный и минимальный уровни воды, допустимые для данного канала;
- 4) коэффициенты пропорциональности, интегральной и дифференциальной составляющих регулятора;
- 5) время установления и перерегулирования системы.

На основе этих параметров можно определить оптимальные настройки ПИД-регуляторов, которые обеспечат поддержание желаемого уровня воды в канале.

При проектировании системы автоматического управления водораспределением в канале с использованием ПИД-регуляторов необходимо также учитывать динамические характеристики системы, такие как скорость потока воды и время задержки при передаче управляющего сигнала [8]. Эти параметры могут влиять на точность управления и требуют дополнительной настройки регулятора.

Для решения задачи поддержания определенного уровня воды в канале при проектировании системы автоматического управления водой с использованием ПИД-регуляторов необходимо установить датчик уровня воды в канале и подключить его к контроллеру. Затем контроллер должен быть настроен на получение информации от датчика уровня и на выдачу управляющего сигнала в соответствии с заданным уровнем воды.

Для этого нужно выбрать соответствующий тип ПИД-регулятора, настроить его параметры таким образом, чтобы достичь требуемой точности и скорости регулирования уровня воды в канале. Параметры, которые следует учитывать при настройке ПИД-регулятора, включают коэффици-

енты пропорциональности, интегральной и дифференциальной составляющих, а также диапазон допустимых значений управляющего сигнала.

Важно также учитывать динамические свойства самого канала, например, его скорость потока, расход воды, наличие перегораживающих сооружений, изменения уровня воды в канале в течение суток, аккумулирующую способность каждого бьефа и т. д. Все эти параметры могут влиять на эффективность работы системы управления, поэтому необходимо учесть их при проектировании и настройке системы.

При этом система автоматического управления может использовать информацию о текущем уровне воды в канале и сигналы с датчиков, чтобы поддерживать заданный уровень воды путем регулирования расхода воды. Для этого может быть использован ПИД-регулятор, который позволяет быстро и точно регулировать расход воды в соответствии с заданным уровнем [9];

- требования к системе управления: необходимо указать требования к системе управления, такие как требуемая точность управления, скорость реакции на изменения в системе, гибкость управления и т. д.

Точность управления в ДМК при использовании системы автоматического управления с ПИД-регуляторами и схемой управления по верхнему бьефу зависит от многих факторов, включая характеристики канала, оборудования и используемой системы управления [10]. Если система автоматического управления водораспределением в канале проектируется и настраивается оптимально, то можно достичь высокой точности управления уровнем воды. В идеальных условиях, когда все параметры находятся в пределах допустимых значений и система работает без сбоев, точность управления уровнем воды с помощью ПИД-регуляторов может достигать нескольких сантиметров.

Однако при проектировании системы необходимо учитывать факторы, которые могут снижать точность управления, такие как воздействие

ветра, вибрации и т. д. Также стоит учитывать, что с течением времени оборудование и параметры канала могут меняться, это может влиять на точность управления. Поэтому важно регулярно проводить техническое обслуживание и перенастраивать систему для достижения наилучшей точности управления [11, 12].

Результаты точности управления при использовании системы автоматического управления технологическим процессом водораспределения в канале с использованием ПИД-регуляторов зависят от многих факторов, таких как точность датчиков уровня воды, скорость потока воды, влияние окружающих условий и т. д. Однако в целом использование ПИД-регуляторов в системе автоматического управления водой позволяет достичь точности контроля уровня воды от 1 до 3 см в стабильных условиях. В более сложных условиях точность управления может быть чуть хуже, но все равно достаточно высокой [13].

В любом случае для достижения высокой точности управления необходимо учитывать многие факторы и проводить тщательную настройку системы, а также подбирать оптимальные параметры ПИД-регуляторов в зависимости от конкретных условий;

- описание аппаратного обеспечения: необходимо описать аппаратное обеспечение, которое будет использоваться для реализации системы управления. В частности, это может быть программируемый контроллер или микроконтроллер, модули управления двигателем и т. д.

Для проектирования системы автоматического управления водораспределением в канале с применением ПИД-регуляторов при использовании схемы управления по верхнему бьефу в ДМК могут быть применены различные компоненты аппаратного обеспечения. Некоторые из возможных компонентов включают:

1) программируемые логические контроллеры (ПЛК), такие как Siemens SIMATIC S7, Allen-Bradley ControlLogix и др. Эти контроллеры пред-

назначены для автоматизации промышленных процессов и управления ими и широко используются в системах управления водораспределением;

2) интерфейсы сбора данных, такие как SCADA-системы, которые позволяют собирать, мониторить данные из различных источников и управлять ими. SCADA-системы также могут быть использованы для оптимизации процесса управления водой в канале;

3) датчики и измерительное оборудование, например, ультразвуковые датчики уровня, магнитные датчики расхода, датчики давления и т. д. Эти компоненты могут использоваться для измерения параметров канала и обеспечения данных для ПИД-регуляторов;

4) преобразователи частоты используются для управления скоростью двигателей и насосов в системе управления водой в канале;

5) коммуникационное оборудование – для передачи данных между различными компонентами системы управления водой в канале;

б) компьютеры и серверы используются для хранения данных, программирования системы управления и мониторинга процесса управления водой в канале.

Конкретный выбор аппаратного обеспечения зависит от требований конкретной системы управления технологическим процессом водораспределения в канале, таких как количество насосных станций, длина канала, требования к точности управления и т. д.;

- описание ПИД-регуляторов: необходимо описать ПИД-регуляторы, которые будут использоваться в системе управления. Необходимо указать тип регулятора, коэффициенты регулирования, параметры и ограничения на сигнал управления и т. д.

Выбор типа ПИД-регулятора и его параметров зависит от требуемой точности и динамики управления, а также от свойств конкретного объекта управления (ДМК).

Пример типичных значений коэффициентов ПИД-регулятора для си-

стемы управления уровнем воды в канале по верхнему бьефу можно представить следующим образом:

- 1) пропорциональный коэффициент (K_p) – от 0,1 до 1,0;
- 2) интегральный коэффициент (K_i) – от 0,01 до 0,5;
- 3) дифференциальный коэффициент (K_d) – от 0,01 до 0,5.

Однако эти значения являются примерными и могут быть скорректированы в зависимости от конкретных условий и требований к системе управления.

Параметры и ограничения на сигнал управления также зависят от свойств объекта управления и требований к системе управления. Важно учесть ограничения на пропускную способность канала и на максимальный уровень воды в канале.

В целом для оптимальной настройки ПИД-регулятора и определения ограничений на сигнал управления необходимо провести экспериментальные исследования и анализ результатов работы системы управления в режиме реального времени.

В качестве примера можно рассмотреть настройки ПИД-регулятора для управления уровнем воды в канале по верхнему бьефу в ДМК. Здесь приведены некоторые возможные значения коэффициентов регулирования и ограничения на сигнал управления:

- 1) коэффициент пропорциональности (P): 1;
- 2) коэффициент интегрирования (I): 0,1;
- 3) коэффициент дифференцирования (D): 0,01;
- 4) ограничение на сигнал управления: от 0 до 100 %.

Эти значения не являются оптимальными и могут быть изменены в зависимости от конкретных условий системы, таких как скорость изменения уровня воды в канале, время задержки и т. д. Также для улучшения точности управления могут использоваться несколько ПИД-регуляторов в каскаде.

Для проектирования ПИД-регулятора можно использовать различные инструменты, такие как специализированные программы, библиотеки для языков программирования или функциональные блоки для ПЛК [14]. Например, в программе Simulink от MathWorks доступны готовые блоки для проектирования ПИД-регуляторов.

Важно также учитывать особенности конкретной системы управления водораспределением в канале, такие как гидравлические характеристики канала, характеристики используемых насосов и т. д., при выборе параметров регулятора. Рекомендуется проводить настройку ПИД-регулятора на месте с учетом этих особенностей;

- описание системы сбора данных: необходимо описать систему сбора данных, которая будет использоваться для мониторинга процесса управления. Необходимо указать датчики, которые будут использоваться для измерения параметров канала и объема воды, а также способы передачи данных от датчиков к системе управления.

Для мониторинга процесса управления в системе автоматического управления водой в ДМК с применением ПИД-регуляторов при использовании схемы управления по верхнему бьефу можно применять различные системы сбора данных в зависимости от требуемой точности и сложности мониторинга.

Одним из способов сбора данных для мониторинга процесса управления может быть использование системы сбора данных на основе Интернета вещей (IoT). С помощью модулей сбора данных, оснащенных интерфейсами сетевой связи, собранные данные могут быть переданы на облачные серверы, где они будут обрабатываться и храниться в базе данных. Затем с помощью прикладного программного обеспечения (например, веб-интерфейса) данные могут быть визуализированы и проанализированы, чтобы мониторить процесс управления и принимать решения о корректировке параметров системы управления, если это необходимо. Некоторые

из популярных платформ для разработки IoT-систем включают в себя Raspberry Pi, Arduino, ESP32 и др. Для передачи данных можно использовать различные протоколы, такие как MQTT, HTTP и др. Важно также обеспечить достаточный уровень безопасности для защиты данных от несанкционированного доступа.

В качестве простой и дешевой опции можно использовать систему сбора данных на базе микроконтроллера Arduino или Raspberry Pi, снабженную соответствующими датчиками. Для мониторинга уровня воды в канале можно использовать датчики давления, ультразвуковые датчики или другие типы датчиков уровня воды. Для измерения расхода можно использовать различные типы датчиков расхода, например, магнитные, ультразвуковые, вихревые и т. д. Для измерения температуры воды можно использовать датчики температуры, такие как термисторы или термопары.

Для более сложных и точных систем мониторинга и управления можно использовать специализированное оборудование, такое как системы SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) или DCS (Distributed Control System). Эти системы могут интегрировать большой набор датчиков и устройств управления, а также предоставлять широкие возможности для визуализации и анализа данных.

Для сбора и передачи данных можно использовать специализированные системы сбора и анализа данных (DAS). Эти системы могут обрабатывать и анализировать данные, а также отображать информацию в режиме реального времени, что позволяет операторам получать доступ к информации об управлении процессом.

В качестве средств связи для передачи данных можно использовать кабельную сеть, беспроводные технологии связи, такие как Wi-Fi, Bluetooth или LoRaWAN, или комбинацию различных технологий для обеспечения надежной передачи данных.

Помимо этого, можно использовать базу данных для хранения и ана-

лиза данных. Это позволяет сохранять исторические данные о процессе управления водой, что может быть полезно для анализа и оптимизации системы управления.

В качестве программного обеспечения для обработки данных можно использовать различные инструменты, такие как MATLAB, Python с библиотеками для обработки данных, например, Pandas, Numpy, Matplotlib и др. Для сохранения и хранения данных можно использовать базы данных, такие как MySQL, PostgreSQL, MongoDB и др., в зависимости от требований к производительности, масштабируемости, надежности и других факторов.

Важно учитывать требования к системе сбора данных, такие как скорость обработки, частота сбора данных, объем данных, требования к безопасности и приватности и др. Оптимальный выбор инструментов и систем будет зависеть от конкретных требований проекта и доступных ресурсов;

- описание алгоритма управления: необходимо описать алгоритм управления, который будет использоваться в системе управления. В частности, это может быть алгоритм, основанный на ПИД-регуляторах, который будет регулировать уровень воды в канале.

Алгоритм управления уровнем воды в канале по верхнему бьефу с использованием ПИД-регуляторов может иметь следующий вид:

- 1) измерение уровня воды в канале при помощи ультразвуковых датчиков и передача данных на контроллер;
- 2) вычисление ошибки управления как разности заданного уровня воды и текущего измеренного уровня;
- 3) вычисление сигнала управления при помощи ПИД-регулятора с использованием коэффициентов регулирования, параметров и ограничений, определенных в процессе проектирования;
- 4) отправка сигнала управления на исполнительный механизм, такой как шлюз или ворота, чтобы изменить расход воды;

5) повторение процесса измерения, вычисления ошибки и сигнала управления с заданной частотой, чтобы поддерживать нужный уровень воды.

При этом следует учитывать возможность наличия неопределенности в моделировании, а также ограничения по изменению расхода воды, чтобы избежать качества воды ниже допустимых уровней в канале;

- требования к надежности и безопасности: необходимо описать требования к надежности и безопасности системы управления. В частности, это могут быть требования к стойкости системы к возможным сбоям и отказам, требования к обеспечению безопасности при работе с системой, а также требования к защите данных.

При проектировании системы автоматического управления технологическим процессом водораспределения в ДМК с применением ПИД-регуляторов с использованием схемы управления уровнем воды по верхнему бьефу следует учитывать следующие требования к надежности и безопасности:

1) надежность: система должна быть достаточно надежной, чтобы обеспечивать стабильное управление уровнем воды в канале в широком диапазоне условий эксплуатации, включая изменения потока воды, внешних условий, сбои в работе оборудования и т. д.;

2) безопасность: система должна быть безопасной для использования и не должна представлять угрозу для жизни и здоровья людей, находящихся вблизи канала или работающих в системе управления. Должны быть приняты меры для защиты от аварийных ситуаций, таких как переполнение канала или аварийное прекращение работы системы управления;

3) резервирование: необходимо предусмотреть резервные каналы и резервное оборудование для обеспечения непрерывности работы системы управления в случае отказа основного оборудования или каналов;

- требования к производительности: необходимо описать требования к производительности системы управления. Это может включать

требования к скорости обработки данных, времени реакции на изменения в системе, требования к использованию памяти и т. д.

При проектировании системы автоматического управления водой в ДМК с применением ПИД-регуляторов с использованием схемы управления уровнем воды по верхнему бьефу требования к производительности должны быть определены с учетом следующих факторов [15]:

1) скорость реакции: система должна быстро реагировать на изменения уровня воды в канале для обеспечения точного управления им. Реакция системы должна быть быстрой и точной, чтобы избежать переливов или недостатка воды;

2) частота измерений: для обеспечения точного управления уровнем воды в канале система должна иметь достаточно высокую частоту измерений. Это может быть связано с выбором соответствующих датчиков, а также с аппаратными возможностями системы;

3) частота обновления управляющего сигнала: система должна обновлять управляющий сигнал на достаточно высокой частоте, чтобы обеспечить быстрое и точное управление уровнем воды в канале;

4) время отклика: система должна иметь быстрый отклик для эффективного управления процессом. Время отклика может зависеть от различных факторов, таких как аппаратное обеспечение, используемые алгоритмы управления и т. д.;

5) обработка данных: для обработки большого объема данных, которые генерируются системой, может потребоваться использование высокопроизводительного аппаратного обеспечения;

6) пропускная способность: система должна обеспечивать достаточную пропускную способность для обеспечения управления потоком воды в канале;

7) эффективность: система должна быть эффективной, чтобы обеспечить оптимальное использование ресурсов и минимизировать затраты на электроэнергию;

8) точность: система должна обеспечивать достаточную точность управления уровнем воды в канале;

9) система мониторинга и диагностики: система должна иметь механизмы мониторинга и диагностики, чтобы обеспечить быстрое выявление проблем и возможность их устранения. Мониторинг и диагностика должны быть интегрированы в систему управления, чтобы обеспечить непрерывную работу системы;

10) масштабируемость: если в будущем потребуется расширить систему, например, добавлять дополнительные каналы, система должна быть способной масштабироваться без существенного ухудшения производительности;

- планируемые сроки проектирования и ввода в эксплуатацию: необходимо определить планируемые сроки проектирования и ввода в эксплуатацию системы управления. Необходимо учитывать не только время на разработку и тестирование системы, но и время на ее установку и настройку на месте.

Приблизительные сроки можно определить на основе примерных объемов работ. Необходимо провести детальную проектную работу по подготовке схемы управления, подбору оборудования и компонентов, определению требований к системе, а также произвести монтаж и настройку системы. Приблизительно проектирование и ввод в эксплуатацию системы может занять от 1 до 3 лет.

Так как поливной период начинается в мае и заканчивается в октябре, а протяженность канала составляет более 100 км со значительным количеством водовыделов, следует учитывать сезонность работ, а также необходимость монтажа и настройки системы в каждом из водовыделов. План работ и график установки оборудования должны быть тщательно проработаны, чтобы обеспечить выполнение работ в установленные сроки.

Результаты и обсуждение. При проектировании системы управле-

ния следует учитывать конфигурацию канала и принимать меры для обеспечения равномерного распределения воды по всей его длине с учетом неустановившегося движения воды в канале. Кроме того, следует учитывать высоту берегов и расстояния до водовыделов для оптимального управления уровнем воды.

Система управления должна обеспечивать надежность и безопасность работы канала, исключать вероятность перепадов напора, прорывов и других аварийных ситуаций.

При проектировании системы управления следует учитывать совместимость с уже существующими системами управления в канале, а также возможность интеграции новой системы с существующей инфраструктурой.

Система управления должна быть доступной для управления и контроля, а также легко управляемой и масштабируемой, чтобы обеспечить гибкость в случае необходимости внесения изменений.

После того как будет определено и согласовано техническое задание на проектирование системы управления, необходимо выбрать аппаратное и программное обеспечение, которое будет использоваться при ее разработке. Для реализации системы управления водой в канале с использованием ПИД-регуляторов необходимо выбрать микроконтроллер или микропроцессор, который будет управлять процессом управления.

Далее необходимо разработать программное обеспечение, которое будет реализовывать ПИД-регуляторы и обеспечивать управление системой. Для этого можно использовать специальные инструменты разработки, такие как IDE (Integrated Development Environment), которые позволяют создавать программы для микроконтроллеров и микропроцессоров [15–17].

После того как будет разработано программное обеспечение, необходимо провести тестирование системы управления на специально подготовленном стенде. На этом этапе можно проверить работу ПИД-регуляторов и провести настройку параметров системы управления [9, 18, 19].

Когда система управления будет готова, необходимо установить ее на месте и произвести настройку в соответствии с конкретными условиями работы. После этого можно начинать использовать систему управления в реальных условиях.

Выводы. Управление водораспределением в условиях высокодинамичного водопотребления является сложной задачей, которая требует специальных знаний и опыта в области гидравлики открытых русел, автоматизации и управления. При проектировании системы необходимо учитывать все особенности конкретного проекта и следовать принципам надежности и безопасности.

После внедрения системы автоматического управления водой в канале необходимо проводить регулярное техническое обслуживание и мониторинг работы системы. В рамках технического обслуживания необходимо проверять работу аппаратного и программного обеспечения, проводить настройку параметров системы и замену неисправных компонентов.

Для мониторинга работы системы можно использовать различные методы, такие как мониторинг параметров работы системы, анализ журналов событий и оповещения об аварийных ситуациях. Это позволит быстро обнаружить возможные неисправности и принять меры по их устранению.

Кроме того, необходимо разработать планы экстренных мероприятий и тренировать персонал на случай аварийных ситуаций. В случае аварийных ситуаций необходимо быстро реагировать и принимать меры по предотвращению ущерба и обеспечению безопасности людей.

В целом система автоматического управления технологическим процессом водораспределения в канале с использованием ПИД-регуляторов является эффективным инструментом для управления процессом движения воды в канале. Она позволяет автоматизировать процесс управления, улучшить качество управления и повысить надежность и безопасность работы системы. Однако внедрение и эксплуатация такой системы требует

серьезной подготовки и опыта в области гидравлики, автоматизации и управления.

Список источников

1. Ядров Ю. Г. Основы автоматизированного управления технологическими процессами. М.: Литера, 2019. 189 с.
2. Ткачев А. А., Ольгаренко И. В. Современные проблемы в управлении водораспределением в магистральных каналах оросительных систем // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]. 2021. Т. 11, № 2. С. 1–23. URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1192> (дата обращения: 01.07.2023). DOI: 10.31774/2222-1816-2021-11-2-1-23.
3. Болатбеков М. А., Байсакалов Б. А. Проектирование систем автоматического управления. Алматы: КазНУ, 2012. 157 с.
4. Automation of water distribution management during the reconstruction of main irrigation canals / A. A. Tkachev, Yu. G. Ivanenko, V. V. Zarubin, I. V. Olgarenko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 537. 032070. DOI: 10.1088/1757-899X/537/3/032070.
5. Кроневетер А. В., Костромина А. Г. Системы автоматического управления. СПб.: Питер, 2016. 214 с.
6. Данилов В. П., Попов Е. П. Проектирование систем автоматического управления. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2004. 178 с.
7. Чэн Ч. Устойчивость в неустановившемся гидравлическом движении. М.: Мир, 1989. 215 с.
8. Барух М. Элементы теории искусственного интеллекта в системах управления. М.: Наука, 2006. 173 с.
9. Variational estimation of effective channel and ungauged anabranching river discharge from multi-satellite water heights of different spatial sparsity / P.-A. Garambois, K. Larnier, J. Monnier, P. Finaud-Guyot, J. Verley, A.-S. Montazem, S. Calmant // Journal of Hydrology. 2020. Vol. 581. 124409. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124409>.
10. Исследование процессов трансформации расходов и глубин воды в деривационном канале ГЭС при суточном регулировании стока / Ю. Г. Иваненко, А. А. Ткачев, А. М. Бакштанин, К. Г. Гурин // Гидротехническое строительство. 2022. № 4. С. 26–30. <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2022.64.50.005>.
11. Чоу В. Теория неустановившегося движения жидкостей. М.: Мир, 1973. 188 с.
12. Крушинский В. М., Боков С. Н. Открытые гидравлические каналы. М.: Высш. шк., 1987. 209 с.
13. Чейлд Р., Фалл А. Р. Расчет открытых каналов: гидрология и гидравлика. М.: Стройиздат, 1987. 166 с.
14. Стивенсон У. Дж. Промышленное управление и регулирование. М.: Техносфера, 2010. 230 с.
15. Манн Дж., Рейнольдс Дж. Микроконтроллеры: принципы и применение. М.: Техносфера, 2007. 218 с.
16. Control theory-based data assimilation for open channel hydraulic models: tuning PID controllers using multi-objective optimization / M. Milašinović, D. Prodanović, M. Stanić, B. Zindović, B. Stojanović, N. Milivojević // Journal of Hydroinformatics. 2022, 1 July. 24(4). P. 898–916. <https://doi.org/10.2166/hydro.2022.034>.
17. PID controllers as data assimilation tool for 1D hydrodynamic models of different complexity / M. Milašinović, B. Zindović, N. Rosić, D. Prodanović // Advances in Hydroin-

formatics / P. Gourbesville, G. Caignaert (eds). Singapore: Springer, 2020. P. 1009–1022. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5436-0_76.

18. Deep learning data-intelligence model based on adjusted forecasting window scale: application in daily streamflow simulation / M. Fu, T. Fan, Z. Ding, S. Q. Salih, N. Al-Ansari, Z. M. Yaseen // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 32632–32651. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2974406.

19. Improving flood forecasting using an input correction method in urban models in poorly gauged areas / M. C. Fava, M. Mazzoleni, N. Abe, E. M. Mendingo, D. P. Solomatine // Hydrological Sciences Journal. 2020. 65(7). P. 1096–1111. <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2020.1729984>.

References

1. Yadrov Yu.G., 2019. *Osnovy avtomatizirovannogo upravleniya tekhnologicheskimi protsessami* [Fundamentals of Automated Control of Technological Processes]. Moscow, Lira Publ., 189 p. (In Russian).

2. Tkachev A.A., Olgarenko I.V., 2021. [Urgent problems of water distribution management in main canals of irrigation systems]. *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii*, vol. 11, no. 2, pp. 1-23, available: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1192> [accessed 01.07.2023], DOI: 10.31774/2222-1816-2021-11-2-1-23. (In Russian).

3. Bolatbekov M.A., Baisakalov B.A., 2012. *Proektirovanie sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Design of Automatic Control Systems]. Almaty, KazNU, 157 p. (In Russian).

4. Tkachev A.A., Ivanenko Yu.G., Zarubin V.V., Olgarenko I.V., 2019. Automation of water distribution management during the reconstruction of main irrigation canals. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 537, 032070, DOI: 10.1088/1757-899X/537/3/032070.

5. Kroneveter A.V., Kostromina A.G., 2016. *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya* [Automatic Control Systems]. St. Petersburg, Piter Publ., 214 p. (In Russian).

6. Danilov V.P., Popov E.P., 2004. *Proektirovanie sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Design of Automatic Control Systems]. St. Petersburg, SPbGETU “LETI”, 178 p. (In Russian).

7. Chen Ch., 1989. *Ustoychivost' v neustanovivshemsya gidravlicheskom dvizhenii* [Stability in Unsteady Hydraulic Motion]. Moscow, Mir Publ., 215 p. (In Russian).

8. Baruch M., 2006. *Elementy teorii iskusstvennogo intellekta v sistemakh upravleniya* [Elements of the Theory of Artificial Intelligence in Control Systems]. Moscow, Nauka Publ., 173 p. (In Russian).

9. Garambois P.-A., Larnier K., Monnier J., Finaud-Guyot P., Verley J., Montazem A.-S., Calmant S., 2020. Variational estimation of effective channel and ungauged anabranching river discharge from multi-satellite water heights of different spatial sparsity. *Journal of Hydrology*, vol. 581, 124409, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124409>.

10. Ivanenko Yu.G., Tkachev A.A., Bakshtanin A.M., Gurin K.G., 2022. *Issledovanie protsessov transformatsii raskhodov i glubin vody v derivatsionnom kanale GES pri sustochnom regulirovanii stoka* [Investigation of transformation processes and depth of water in the derivation channel of the HHP during daily runoff regulation]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Power Technology and Engineering], no. 4, pp. 26-30, <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2022.64.50.005>. (In Russian).

11. Chow V., 1973. *Teoriya neustanovivshegosya dvizheniya zhidkostey* [Theory of Unsteady Motion of Liquids]. Moscow, Mir Publ., 188 p. (In Russian).

12. Krushinsky V.M., Bokov S.N., 1987. *Otkrytye gidravlicheskie kanaly* [Open Channel Hydraulics]. Moscow, Higher School Publ., 209 p. (In Russian).

13. Cheild R., Fall A.R., 1987. *Raschet otkrytykh kanalov: gidrologiya i gidravlika*

[Calculation of Open Channels: Hydrology and Hydraulics]. Moscow, Stroyizdat Publ., 166 p. (In Russian).

14. Stevenson W.J., 2010. *Promyshlennoe upravlenie i regulirovanie* [Production/Operations Management]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 230 p. (In Russian).

15. Mann J., Reynolds J., 2007. *Mikrokontrollery: printsipy i primeneniye* [Microcontrollers: Principles and Applications]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 218 p. (In Russian).

16. Milašinović M., Prodanović D., Stanić M., Zindović B., Stojanović B., Milivojević N., 2022. Control theory-based data assimilation for open channel hydraulic models: tuning PID controllers using multi-objective optimization. *Journal of Hydroinformatics*, 24(4), pp. 898-916, <https://doi.org/10.2166/hydro.2022.034>.

17. Milašinović M., Zindović B., Rosić N., Prodanović D. (authors), Gourbesville P., Caignaert G. (eds), 2020. PID controllers as data assimilation tool for 1D hydrodynamic models of different complexity. *Advances in Hydroinformatics*. Singapore, Springer, pp. 1009-1022, https://doi.org/10.1007/978-981-15-5436-0_76.

18. Fu M., Fan T., Ding Z., Salih S.Q., Al-Ansari N., Yaseen Z.M., 2020. Deep learning data-intelligence model based on adjusted forecasting window scale: application in daily stream-flow simulation. *IEEE Access*, vol. 8, pp. 32632-32651, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2974406.

19. Fava M.C., Mazzoleni M., Abe N., Mendiondo E.M., Solomatine D.P., 2020. Improving flood forecasting using an input correction method in urban models in poorly gauged areas. *Hydrological Sciences Journal*, 65(7), pp. 1096-1111, <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2020.1729984>.

Информация об авторах

А. А. Ткачев – заведующий кафедрой гидротехнического строительства, доктор технических наук, доцент, Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт имени А. К. Кортунова – филиал Донского государственного аграрного университета, Новочеркасск, Российская Федерация, prof_al@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8060-620X>;

А. М. Анохин – профессор кафедры гидротехнического строительства, кандидат технических наук, профессор, Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт имени А. К. Кортунова – филиал Донского государственного аграрного университета, Новочеркасск, Российская Федерация, anocxin2014@yandex.ru;

И. Г. Литуновский – аспирант, Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт имени А. К. Кортунова – филиал Донского государственного аграрного университета, Новочеркасск, Российская Федерация, gts_i_sm.nimi@mail.ru;

Д. А. Симончук – аспирант, Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт имени А. К. Кортунова – филиал Донского государственного аграрного университета, Новочеркасск, Российская Федерация, gts_i_sm.nimi@mail.ru.

Information about the authors

A. A. Tkachev – Head of the Department of Hydraulic Engineering, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Novochoerkassk Engineering and Land Reclamation Institute – branch of the Don State Agrarian University, Novochoerkassk, Russian Federation, prof_al@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8060-620X>;

A. M. Anokhin – Professor of the Department of Hydraulic Engineering, Candidate of Technical Sciences, Professor, Novochoerkassk Engineering and Land Reclamation Institute – branch of the Don State Agrarian University, Novochoerkassk, Russian Federation, anocxin2014@yandex.ru;

I. G. Litunovsky – Postgraduate Student, Novochoerkassk Engineering and Land Reclamation Institute – branch of the Don State Agrarian University, Novochoerkassk, Russian Federation, gts_i_sm.nimi@mail.ru;

D. A. Simonchuk – Postgraduate Student, Novochoerkassk Engineering and Land Reclama-

tion Institute – branch of the Don State Agrarian University, Novocherkassk, Russian Federation, gts_i_sm.nimi@mail.ru.

*Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Все авторы в равной степени несут ответственность за нарушения в сфере этики научных публикаций.*

*Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
All authors are equally responsible for ethical violations in scientific publications.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.*

*Статья поступила в редакцию 03.07.2023; одобрена после рецензирования 16.08.2023;
принята к публикации 15.09.2023.
The article was submitted 03.07.2023; approved after reviewing 16.08.2023; accepted for
publication 15.09.2023.*