(E) ISSN: 3030-3214
Volume 4, № 3-1
2026

УДК: 528.94:556.166

10.70769/3030-3214.SRT.4.3-1.2026.29

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

СИСТЕМНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АЛГОРИТМИЗАЦИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ВОДОРАСПРЕДЕЛЕНИЕМ В ИРРИГАЦИОННОМ КАНАЛЕ



Сейтов Айбек Джумабаевич

Профессор, Университет мировой экономики и дипломатии, Ташкент, Узбекистан
E-mail: a.seyitov@uwed.uz
ORCID ID: 0009-0002-8904-5178
Science ID: DQR-0925-0017



Ярашов Иномжон Кахрамон угли

Кандидат физико-математических наук (PhD), Университет мировой экономики и дипломатии, Ташкент, Узбекистан
E-mail: i.yarashov@uwed.uz
ORCID ID: 0000-0002-0855-3318
Science ID: MTN-0225-0122



Умарова Шоирахон Гуломовна

Доцент, Университет мировой экономики и дипломатии, Ташкент, Узбекистан
E-mail: umshoira@gmail.com
ORCID ID: 0009-0007-9064-6129
Science ID: FAN-0525-0039



Чориёров Нурбек Килич угли

Докторант (PhD) Научно-исследовательского института ирригации и водных проблем, преподаватель Университета мировой экономики и дипломатии, Ташкент, Узбекистан
E-mail: n.choriyorov@uwed.uz
ORCID ID: 0000-0001-7289-0303
Science ID: FQD-0626-0090

Аннотация. *В статье исследуются вопросы математического моделирования и алгоритмизации процессов автоматического управления водораспределением в ирригационном канале как сложной динамической системе. Основная цель исследования заключается в разработке системного подхода, направленного на обеспечение устойчивого регулирования уровня воды, повышение эффективности использования водных ресурсов, а также точности и надёжности процессов управления. Предложен комплексный подход, объединяющий математическую модель гидравлического объекта, численные методы расчёта, многосенсорную измерительную систему, алгоритмы автоматического регулирования и критерии оценки качества управления. Динамика движения воды в ирригационном канале описана системой дифференциальных уравнений неустановившегося движения жидкости. Для численного решения математической модели использован конечно-разностный метод, а для обеспечения устойчивости вычислительного процесса учитывается условие Куранта–Фридрихса–Леви (CFL). Автоматическое регулирование уровня воды осуществляется на основе ошибки регулирования, формируемой по данным двух измерительных точек. Кроме того, разработана формальная модель на основе сети Петри, описывающая последовательность этапов измерения, вычисления ошибки, формирования управляющего воздействия, проверки его допустимости и исполнения управляющей команды. В ходе исследования проанализированы переходные процессы, возникающие при уменьшении расхода воды, и установлено, что использование двух измерительных точек позволяет снизить максимальную ошибку регулирования по сравнению с односенсорной системой управления. Предложенные математическая модель и алгоритмы управления имеют практическое значение для автоматизации водораспределения в ирригационных каналах и разработки программно-алгоритмических комплексов управления водохозяйственными объектами.*

Ключевые слова: *системный анализ, математическое моделирование, ирригационный канал, водораспределение, автоматическое управление уровнем воды, численные методы, конечно-разностный метод, многосенсорное управление, сеть Петри, инвариант, алгоритм управления, автоматизация.*

Received: 14.09.2026 | Accepted: 10.10.2026 | Issue publication: 10.10.2026

IRRIGATSIYA KANALIDA SUV TAQSIMOTINI AVTOMATIK BOSHQARISHNI TIZIMLI MODELLASHTIRISH VA ALGORITMLASHTIRISH

Seytov Aybek Jumabayevich
Professor, Jahon iqtisodiyoti va diplomatiya universiteti, Toshkent, O‘zbekiston

Yarashov Inomjon Qahramon o‘g‘li
Fizika-matematika fanlari nomzodi (PhD), Jahon iqtisodiyoti va diplomatiya universiteti, Toshkent, O‘zbekiston

Umarova Shoiraxon G‘ulomovna
Dotsent, Jahon iqtisodiyoti va diplomatiya universiteti, Toshkent, O‘zbekiston

Choriyorov Nurbek Qilich o‘g‘li
Irrigatsiya va suv muammolari ilmiy-tadqiqot instituti tayanch doktoranti (PhD), Jahon iqtisodiyoti va diplomatiya universiteti o‘qituvchisi, Toshkent, O‘zbekiston

Annotatsiya. *Ushbu maqolada irrigatsiya kanalida suv taqsimotini avtomatik boshqarish jarayonlarini murakkab dinamik tizim sifatida matematik modellashtirish va algoritmlashtirish masalalari tadqiq etilgan. Tadqiqotning asosiy maqsadi irrigatsiya kanallarida suv sathini barqaror boshqarish, suv resurslaridan samarali foydalanish hamda boshqaruv jarayonlarining aniqligi va ishonchliligini oshirishga qaratilgan tizimli yondashuvni ishlab chiqishdan iborat. Ishda gidravlik obyektning matematik modeli, sonli hisoblash usullari, ko‘p sensorli o‘lchash tizimi, avtomatik rostlash algoritmlari va boshqaruv sifatini baholash mezonlarini birlashtiruvchi kompleks yondashuv taklif etilgan. Irrigatsiya kanalidagi suv harakati dinamikasi suyuqlikning beqaror harakatini ifodalovchi differensial tenglamalar tizimi asosida modellashtirilgan. Matematik modelni sonli yechishda chekli ayirmalar usulidan foydalanilgan hamda hisoblash jarayonining barqarorligini ta’minlash maqsadida Kurant–Fridrixs–Levi (CFL) sharti hisobga olingan. Suv sathini avtomatik boshqarish ikki o‘lchash nuqtasidan olinadigan ma’lumotlar asosida shakllantirilgan rostlash xatoligiga tayangan holda amalga oshirilgan. Shuningdek, o‘lchash, xatolikni hisoblash, boshqaruv ta’sirini shakllantirish, uning ruxsat etilgan chegaralarga muvofiqligini tekshirish va boshqaruv buyrug‘ini bajarish bosqichlarini ifodalovchi Petri tarmog‘i asosidagi formal model ishlab chiqilgan. Tadqiqotda suv sarfining kamayishi natijasida yuzaga keladigan o‘tish jarayonlari tahlil qilinib, ikki o‘lchash nuqtasidan foydalanish bir sensorli boshqaruv tizimiga nisbatan maksimal rostlash xatoligini kamaytirishi aniqlangan. Taklif etilgan matematik model va boshqaruv algoritmlari irrigatsiya kanallarida suv taqsimotini avtomatlashtirish hamda suv xo‘jaligi obyektlari uchun dasturiy-algoritmik boshqaruv komplekslarini ishlab chiqishda amaliy ahamiyatga ega.*
Kalit so‘zlar: *tizimli tahlil, matematik modellashtirish, irrigatsiya kanali, suv taqsimoti, suv sathini avtomatik boshqarish, sonli hisoblash usullari, chekli ayirmalar usuli, ko‘p sensorli boshqaruv, Petri tarmog‘i, invariant, boshqaruv algoritmi, avtomatlashtirish.*

SYSTEM MODELING AND ALGORITHMIZATION OF AUTOMATIC CONTROL OF WATER DISTRIBUTION IN AN IRRIGATION CANAL

Seytov Aybek Jumabayevich
Professor, University of World Economy and Diplomacy, Tashkent, Uzbekistan

Yarashov Inomjon Qahramon ugli
Candidate of Physical and Mathematical Sciences (PhD), University of World Economy and Diplomacy, Tashkent, Uzbekistan

Umarova Shoirakhon Gulomovna
Associate Professor, University of World Economy and Diplomacy, Tashkent, Uzbekistan

Choriyorov Nurbek Qilich ugli
PhD Researcher at the Research Institute of Irrigation and Water Problems, Lecturer at the University of World Economy and Diplomacy, Tashkent, Uzbekistan

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 4, № 3-1
2026

Abstract. *This article investigates mathematical modeling and algorithm development for automatic water distribution control in an irrigation canal considered as a complex dynamic system. The main objective of the study is to develop a systematic approach aimed at ensuring stable water level regulation, improving water resource utilization efficiency, and enhancing the accuracy and reliability of control processes. An integrated approach is proposed that combines a mathematical model of the hydraulic system, numerical computational methods, a multi-sensor measurement system, automatic control algorithms, and performance evaluation criteria. Water flow dynamics in the irrigation canal are described by a system of differential equations governing unsteady fluid motion. The finite difference method is employed for the numerical solution of the mathematical model, while the Courant–Friedrichs–Lewy (CFL) condition is considered to ensure the stability of the computational process. Automatic water level regulation is performed based on the control error determined using measurements obtained from two observation points. Furthermore, a formal model based on a Petri net is developed to represent the sequence of measurement, error calculation, control action generation, admissibility verification, and command execution. The study analyzes transient processes caused by a reduction in water discharge and demonstrates that the use of two measurement points reduces the maximum control error compared with a single-sensor control system. The proposed mathematical model and control algorithms have practical significance for automating water distribution in irrigation canals and developing software-based algorithmic control systems for water management facilities.*
Keywords: *systems analysis, mathematical modeling, irrigation canal, water distribution, automatic water level control, numerical methods, finite difference method, multi-sensor control, Petri net, invariant, control algorithm, automation.*

Введение. Ирригационные каналы — пространственно распределённые динамические объекты. Их работа определяется взаимодействием гидравлических, геометрических, технологических и управляющих процессов. Стоит изменить расход воды, положение регулирующих сооружений или добавить внешнее возмущение — и уровень воды вдоль канала меняется, формируя переходные процессы [1, 9].

За последние годы вопросы много-точечного измерения и автоматического регулирования уровня воды в открытых каналах активно исследуются в мировой литературе. Так, в работе [18] представлена система измерения уровня и расхода воды на открытых оросительных каналах, интегрированная со средствами автоматического управления затворами; в обзоре [16] систематизированы современные схемы много-датчикового и много-контроллерного управления ирригационными каналами и показан рост интереса к комбинированным алгоритмам обратной связи по нескольким измерительным точкам. Эти публикации подтверждают актуальность перехода от односенсорных к многосенсорным схемам управления, рассматриваемого в настоящей работе, и определяют место предлагаемого подхода среди современных исследований.

В отличие от локального объекта, ирригационный канал распределён по пространственной координате [2, 3, 7]. Поэтому управляющее воздействие в одном сечении способно повлиять на состояние других участков системы.

Системную постановку задачи запишем в виде [4, 6, 10]

$$\mathcal{S} = \{\mathcal{H}, \mathcal{G}, \mathcal{M}, \mathcal{U}, \mathcal{D}, \mathcal{C}\}, \quad (1)$$

Где: $\mathcal{H}$ — гидравлическая подсистема;

$\mathcal{G}$ — геометрическая подсистема;

$\mathcal{M}$ — подсистема измерения;

$\mathcal{U}$ — подсистема управления;

$\mathcal{D}$ — подсистема возмущений;

$\mathcal{C}$ — вычислительная и программная подсистема.

Научная новизна. В отличие от известных работ, рассматривающих, как правило, отдельные компоненты задачи — либо гидравлическую модель канала, либо схему датчиков [1–3, 18, 19], — в настоящей статье впервые для ирригационного канала предложена сквозная системная модель, объединяющая в единой архитектуре

гидравлическую модель неустановившегося движения воды, конечно-разностный численный метод с контролем устойчивости по условию Куранта–Фридрихса–Леви, двухсенсорную схему измерения и формирования управляющего воздействия, а также формальную логическую модель процесса управления на основе сети Петри с проверкой допустимости команд. Кроме того, впервые для данного объекта корректность и цикличность последовательности управляющих операций верифицированы аналитически с помощью P- и T-инвариантов сети Петри, а эффект перехода от одно- к двухсенсорной схеме измерения выражен количественно: снижение максимальной ошибки регулирования на 44,44–55,56% при увеличении коэффициентов обратной связи с 3 до 5.

Наша цель — разработать математическую и алгоритмическую модель автоматического управления уровнем воды, которая учитывает пространственную распределённость объекта, измерительные данные нескольких датчиков и логическую последовательность управляющих операций.

Материалы и методы. Мы рассматриваем канал как совокупность последовательно связанных локальных участков:

$$\mathcal{K} = K_1 \cup K_2 \cup \ldots \cup K_N \quad (2)$$

Для каждого участка определяем локальный вектор состояния

$$\mathbf{x}_i(t) = \begin{bmatrix} h_i(t) \\ Q_i(t) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где h_i — уровень воды, Q_i — расход.

Общее состояние системы:

$$\mathbf{X}(t) = [\mathbf{x}_1(t), \mathbf{x}_2(t), \ldots, \mathbf{x}_N(t)]^T \quad (4)$$

Так пространственно распределённая задача превращается в совокупность взаимосвязанных локальных моделей.

Математическая модель динамики канала. Движение воды описываем уравнениями сохранения массы и импульса [1, 11]:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_l,$$
$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{Q^2}{A} + gI_1\right) = gA(S_0 - S_f) + q_l v_l \quad (5)$$

Здесь A — площадь живого сечения, Q — расход воды, q_l — боковой приток, g — ускорение свободного падения, S_0 — уклон дна, S_f — гидравлический уклон, I_1 — гидростатический член.

Для прямоугольного сечения:

$$A = bh, \quad (6)$$

где b — ширина канала, h — глубина воды.

Гидравлический радиус:

$$R = \frac{A}{P}, \quad (7)$$

где P — смоченный периметр.

Расход связан с параметрами канала формулой Маннинга:

$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} S_f^{1/2}, \quad (8)$$

где n — коэффициент шероховатости.

Дискретизация математической модели. Для численного моделирования вводим пространственную сетку $x_i = i\Delta x, \quad i = 0,1,\ldots,N$, и временную сетку $t_k = k\Delta t, \quad k = 0,1,\ldots,K$.

Дискретная форма уравнения неразрывности:

$$A_i^{k+1} = A_i^k - \frac{\Delta t}{\Delta x}\left(Q_{i+1}^k - Q_i^k\right) + \Delta t q_{l,i}^k \quad (9)$$

Поскольку $A_i^k = b_i h_i^k$, новое значение уровня:

$$h_i^{k+1} = \frac{A_i^{k+1}}{b_i} \quad (10)$$

Векторная форма вычислительного алгоритма [8, 12]:

$$\mathrm{X}^{k+1} = F(\mathrm{X}^k, u^k, d^k, \theta) \quad (11)$$

где u^k — управляющее воздействие, d^k — возмущение, θ — параметры гидравлической модели.

Условие устойчивости численного алгоритма. Чтобы обеспечить устойчивость численного расчёта, используем условие CFL:

$$\mathrm{CFL} = \max_i \left[\frac{|u_i| + \sqrt{gh_i}}{\Delta x}\Delta t\right] \le C_{\max} \quad (12)$$

Если условие нарушается, временной шаг приходится уменьшать: $\Delta t_{\text{new}} = \alpha \Delta t, \quad 0 < \alpha < 1$.

В вычислительном комплексе этот механизм работает как элемент контроля численной устойчивости.

Математическая постановка задачи управления. Пусть задан требуемый уровень воды h_{set}.

Для каждого датчика ошибка регулирования: $e_{j,k} = h_{\text{set}} - h_{j,k}, \quad j = 1,2$

При двух измерительных точках

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 4, № 3-1
2026

управляющее воздействие формируем так:

$$u_k = u_0 + k_1 e_{1,k} + k_2 e_{2,k} \quad (13)$$

Где: u_0 — базовое управляющее воздействие;

k_1 — коэффициент первого датчика;

k_2 — коэффициент второго датчика.

Управление ограничиваем допустимым диапазоном:

$$u_k = \min\left(u_{\max}, \max(u_{\min}, u_k)\right) \quad (14)$$

Дополнительные условия безопасности: $H_{\min} \le h_k \le H_{\max}$, $Q_{\min} \le Q_k \le Q_{\max}$.

Функция допустимости:

$$G(h_k, Q_k) = \begin{cases} 1, & H_{\min} \le h_k \le H_{\max} \wedge Q_{\min} \le Q_k \le Q_{\max}, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (15)$$

Алгоритм автоматического управления. Алгоритм работает циклически:

Полный цикл цифрового управления уровнем воды в канале организован по замкнутой схеме (рис. 1): на первом этапе регистрируются текущие глубины, которые затем проходят цифровую фильтрацию для устранения стохастических волновых помех; на основе отфильтрованного сигнала рассчитывается рассогласование e_k, формируется управляющее воздействие u_k, проверяется условие допустимости и ограничений $satu_k$ на надзорном уровне сети Петри, после чего скорректированная команда подается на привод гидротехнического затвора.

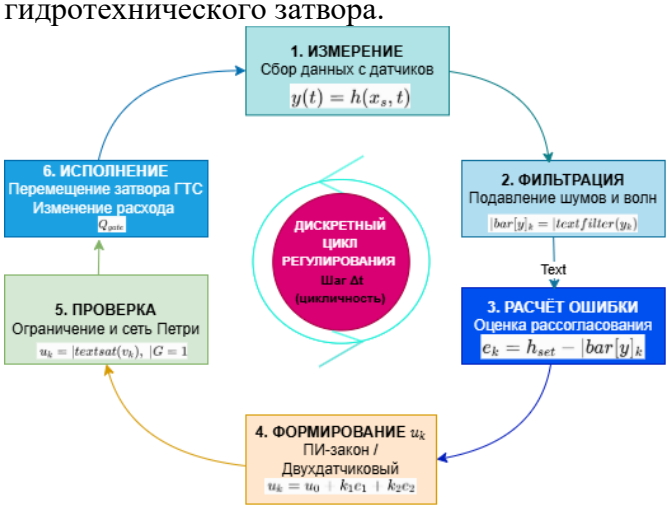


Рис.1. Структура замкнутого алгоритмического цикла регулирования уровня: от метрологической фильтрации измерений до логической верификации и исполнения команды на затворе ГТС.

В исходной экспериментальной постановке использовался интервал цифрового управления порядка 10 минут.

Формальная модель процесса управления на основе сети Петри. Чтобы формализовать последовательность дискретных управляющих операций, вводим сеть Петри

$$PN = (P, T, F, W, M_0), \quad (16)$$

где P — множество позиций, T — множество переходов, F — отношение инцидентности, W — функция весов, M_0 — начальная маркировка.

Определяем шесть позиций:

p_1 :ожидание измерения,
p_2 :измерительные данные получены,
p_3 :расчёт ошибки,
p_4 :расчёт управления,
p_5 :исполнение команды,
p_6 :проверка допустимости.

Переходы:

$$\begin{aligned} t_1 &: p_1 \to p_2, \\ t_2 &: p_2 \to p_3, \\ t_3 &: p_3 \to p_4, \\ t_4 &: p_4 \to p_5, \\ t_5 &: p_5 \to p_6, \\ t_6 &: p_6 \to p_1. \end{aligned} \quad (17)$$

Начальная маркировка:

$$M_0 = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \quad (18)$$

Матрица инцидентности. Входная матрица:

$$I^- = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Выходная матрица:

$$I^+ = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

Матрица инцидентности: $C = I^+ - I^-$, то есть.

$$C = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

Изменение маркировки:

$M_{k+1} = M_k + C\sigma_k,$ (22)

где σ_k — вектор срабатывания переходов.

P-инвариант. Вектор $y = [1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1]^T$ является P-инвариантом, поскольку $C^T y = 0$. Следовательно, $y^T M_k = y^T M_0 = \text{const}$.

При одной исходной фишке:

$\sum_{i=1}^{6} M_i\,(k) = 1$ (22)

Это значит: логический процесс управления сохраняет единство активного состояния цикла.

T-инвариант. Для рассматриваемой циклической структуры $z = [1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1]^T$ удовлетворяет условию $Cz = 0$. Значит, полный цикл $t_1 \to t_2 \to t_3 \to t_4 \to t_5 \to t_6$ возвращает систему к исходной маркировке. Сеть Петри, таким образом, формализует циклическую структуру автоматического регулирования.

Программно-алгоритмический комплекс. Для практической реализации предлагаем модульную архитектуру:

Таблица 1.

Результаты моделирования и оценка качества регулирования уровня воды при ступенчатом возмущении расхода на входе

Схема управления	k_1	k_2	Время установления T_s, мин	Максимальная ошибка E_{max}, см	Снижение ошибки K_E, %
Без регулирования	-	-	-	+50.0	-
Однодатчиковая схема	-	-	140	18.0	Базовый
Двухдатчиковая схема (Режим 1)	3	3	150	10.0	44.44%
Двухдатчиковая схема (Режим 2)	5	5	180	8.0	55.56%

Архитектура разделяет математическую модель, численный решатель, систему управления и логический уровень.

Управляющий алгоритм получает информацию не из одной, а из двух пространственно разнесённых точек.

Программная реализация сети Петри. Анализировать матрицу инцидентности можно средствами символьных вычислений:

Модуль позволяет автоматически проверять структурные свойства логической модели управления.

Экспериментальная постановка. Параметры канала:

Таблица 2.

Основные параметры исследуемого канала

Параметр	Обозначение	Значение
Длина канала	L	9600 м
Начальный расход	Q_0	60 м^3/с
Начальная глубина	h_0	3 м
Ширина	b	15 м
Коэффициент Маннинга	n	0.0175
Коэффициент откоса	m	1.5
Уклон дна	I	0.00035
Интервал управления	Δt	10 мин

Для многосенсорного управления рассматриваем две точки: $x_1 = 200$ м, $x_2 = 9400$ м. Основное возмущение — уменьшение расхода воды. Условия проведения численных экспериментов заданы следующим образом. Пространственная сетка канала построена с шагом Δx = 200 м (N = 48 расчётных участков); шаг по времени Δt автоматически уменьшается при нарушении условия CFL с коэффициентом α=0,5. Все варианты расчёта — без регулирования, односенсорная схема, двухсенсорная схема при $k_1 = k_2 = 3$ и при $k_1 = k_2 = 5$ — стартуют из одинаковых начальных условий ($Q_0 = 60$м^3/с, $h_0 = 3$ м) и рассчитываются при одном и том же сценарии возмущения расхода, что обеспечивает сопоставимость и повторяемость результатов между схемами.

Измерительные точки x_1= 200 м и x_2 = 9400 м моделируют дискретные датчики уровня воды с интервалом опроса, равным интервалу цифрового управления (Δt = 10 мин); в расчётах принято идеализированное измерение без инструментальной погрешности и запаздывания канала связи — это допущение модели оговорено в разделе «Обсуждение».

В одном из переходных режимов: $Q: 60 \to 45$ м^3/с, изменение происходит примерно на 80-й минуте.

В другом режиме:

$Q: 60 \to 50 \ \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$ (23)

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 4, № 3-1
2026

Результаты. ***Результаты односенсорного регулирования.*** При использовании одного измерительного канала переходный процесс восстанавливается медленнее.

Время установления: $T_s \approx 140$ мин, максимальная ошибка регулирования: $E_{\max} \leq 18$ см.

Эти значения используем далее, как базовый вариант для сравнения.

Результаты двух сенсорного управления. Для двух сенсорной схемы рассмотрены два варианта коэффициентов.

Таблица 3.

Сравнение вариантов управления

Схема	k_1	k_2	$E_{\max}$
Один датчик	–	–	≤ 18 см
Два датчика	3	3	≤ 10 см
Два датчика	5	5	≤ 8 см

При $k_1 = k_2 = 3$ время установления составило примерно 150 мин, а максимальная ошибка не превысила 10 см.

При $k_1 = k_2 = 5$ максимальная ошибка уменьшилась примерно до 8 см, но время установления выросло примерно до 180 мин.

Полученная динамика показателей качества регулирования при переходе от одно- к двухсенсорной схеме наглядно представлена на рисунке 2 и обобщена в таблице 1: снижение максимальной ошибки Emax сопровождается ростом времени установления Ts, что иллюстрирует компромисс между точностью и быстродействием контура регулирования.

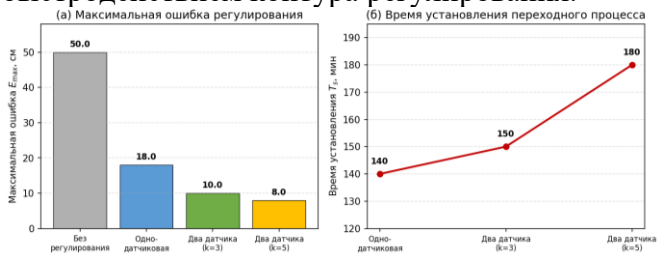


Рис.2. Сравнение максимальной ошибки регулирования E_max (а) и времени установления Ts (б) для различных схем управления по данным таблицы 1.

Относительное уменьшение максимальной ошибки. Для сравнения используем относительный показатель:

$$\eta_E = \frac{E_{\max}^{(1)} - E_{\max}^{(2)}}{E_{\max}^{(1)}} \cdot 100\% \quad (24)$$

Для перехода от 18 см к 10 см:

$$\eta_{E,1} = \frac{18-10}{18} \cdot 100\% = 44.44\% \quad (25)$$

Для перехода от 18 см к 8 см:

$$\eta_{E,2} = \frac{18-8}{18} \cdot 100\% = 55.56\% \quad (26)$$

Иными словами, увеличение коэффициентов обратной связи в исследуемом диапазоне уменьшает максимальное отклонение уровня воды.

Критерии качества управления. Для более полной оценки используем:

$$E_{\max} = \max_k |e_k| \quad (27)$$

$$E_{\text{MAE}} = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}|e_k| \quad (28)$$

$$E_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} e_k^2} \quad (29)$$

Время установления:

$$T_s = \min\{t_k : |e_i| \leq \varepsilon, \quad i \geq k\} \quad (30)$$

Интенсивность изменения управляющего воздействия:

$$U_\Delta = \sum_{k=1}^{N}|u_k - u_{k-1}| \quad (31)$$

Обобщённый функционал качества:

$$J = w_1 E_{\text{RMSE}} + w_2 E_{\max} + w_3 T_s + w_4 U_\Delta \quad (32)$$

Оптимальные параметры регулятора [5, 13, 14]: $\theta^* = \arg\min_\theta J(\theta)$, где $\theta = [k_1, k_2, u_0, \Delta t]$.

Заметим: E_{MAE} и E_{RMSE} можно рассчитать только при наличии полной временной последовательности измерений. Поэтому при отсутствии исходного массива мы не подменяем их искусственными значениями.

Системный анализ. Модель позволяет рассматривать процесс управления на нескольких уровнях.

Физический уровень. На физическом уровне происходит изменение расхода, уровня, площади сечения и других гидравлических параметров.

Измерительный уровень. Измерительная подсистема выдаёт:

$$Y_k = \begin{bmatrix} h_{1,k} \\ h_{2,k} \end{bmatrix} \quad (32)$$

Вычислительный уровень. На вычислительном уровне определяем:

$$E_k = \begin{bmatrix} h_{\text{set}} - h_{1,k} \\ h_{\text{set}} - h_{2,k} \end{bmatrix} \quad (33)$$

Управляющий уровень. На основании вектора ошибки формируем: $u_k = u_0 + \text{K}E_k$, где $\text{K} = [k_1 \quad k_2]$.

Логический уровень. Сеть Петри

контролирует последовательность:

$$p_1 \to p_2 \to p_3 \to p_4 \to p_5 \to p_6 \to p_1 \quad (34)$$

Так математическая, вычислительная и логическая подсистемы объединяются в единую архитектуру.

Оптимизация параметров управления. Одна из задач дальнейшего развития системы — автоматический выбор коэффициентов k_1 и k_2. Пусть $K = (k_1, k_2)$. Тогда задача оптимизации:

$$(k_1^*, k_2^*) = \arg\min_{k_1,k_2} J(k_1, k_2) \quad (35)$$

При этом учитываем ограничения:

$k_{\min} \le k_i \le k_{\max}$,

$u_{\min} \le u_k \le u_{\max}$.

В общем случае критерий:

$$J = w_1 E_{\max} + w_2 T_s + w_3 U_\Delta \quad (36)$$

Если основная цель — минимизировать отклонение уровня, увеличиваем w_1. Если приоритет — быстрое достижение установившегося режима, увеличиваем w_2. Если нужно уменьшить интенсивность изменения управляющего органа, увеличиваем w_3. Так параметры управления можно адаптировать к текущему режиму функционирования канала [15].

Обсуждение. Результаты подтверждают: много сенсорная схема даёт заметное преимущество при оценке пространственное распределённого состояния канала. Одно сенсорная схема использует информацию только в одной точке, поэтому часть сведений о пространственном состоянии объекта остаётся неиспользованной.

Двухсенсорная схема $u_k = u_0 + k_1 e_{1,k} + k_2 e_{2,k}$ учитывает состояние двух участков канала одновременно.

При $k_1 = k_2 = 3$ максимальная ошибка уменьшается примерно до 10 см, а при $k_1 = k_2 = 5$ — до 8 см.

Однако рост коэффициентов не гарантирует улучшения всех характеристик сразу. При $k_1 = k_2 = 5$ время установления увеличивается примерно до 180 минут.

Компромисс между точностью и динамическими характеристиками очевиден [16, 17]: $\min E_{\max} \Rightarrow / \min T_s$.

Поэтому коэффициенты нужно выбирать не только по максимальной ошибке, но и по комплексному критерию.

Системный подход с сетью Петри, кроме того, формализует логическую последовательность управляющих операций и позволяет проверить циклическую структуру алгоритма посредством P- и T-инвариантов.

Количественное сопоставление с результатами других исследований затруднено отсутствием единой методики оценки качества регулирования в цитируемых источниках и различием геометрических и гидравлических параметров каналов. Тем не менее полученное снижение максимальной ошибки регулирования на 44,44–55,56 % при переходе от одно- к двухсенсорной схеме согласуется по порядку величины с эффектом использования пространственно распределённых измерений и автоматического регулирования, отмечаемым в работах по многодатчиковому управлению каналами и водохозяйственными объектами [1, 5, 16–19].

Ограничения исследования.

Укажем несколько ограничений. Полная временная последовательность экспериментальных измерений в исходном материале отсутствует. Поэтому E_{MAE} и E_{RMSE} представлены как расчётные критерии для последующей программной реализации, а не как экспериментальные численные значения.

Рассматриваемая сеть Петри описывает дискретную логику управляющего процесса, но не заменяет непрерывную гидравлическую модель.

Для дальнейшего повышения точности необходимо учитывать дополнительные факторы: задержку распространения возмущений, динамику регулирующего сооружения и возможные шумы датчиков.

Заключение. Мы предложили системный подход к математическому моделированию и алгоритмизации автоматического управления вод распределением в ирригационном канале.

1. Сформирована математическая модель динамики ирригационного канала на основе уравнений сохранения массы и импульса.

2. Выполнена конечно-разностная дискретизация модели, позволяющая реализовать численный алгоритм.

3. Введено условие CFL для контроля устойчивости вычислительного процесса.

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 4, № 3-1
2026

4. Разработана двух сенсорная схема автоматического регулирования.

5. Введены управляющие параметры k_1, k_2 и u_0.

6. Построена логическая модель процесса управления на основе сети Петри.

7. Определены P- и T-инварианты, характеризующие сохранение структуры циклического процесса.

8. Показано: двух сенсорное управление при $k_1 = k_2 = 3$ даёт максимальную ошибку не более 10 см.

9. При $k_1 = k_2 = 5$ максимальная ошибка уменьшается примерно до 8 см, что соответствует снижению относительно базового варианта примерно на 55.56%.

10. Снижение максимальной ошибки регулирования уровня воды на 44,44–55,56 % потенциально позволяет уменьшить непроизводительные потери и объём аварийных сбросов воды на распределительных сооружениях канала, что имеет практическое значение для повышения эффективности водопользования в ирригационных системах.

Предложенный программно-математический комплекс можно расширить для адаптивного выбора параметров регулятора, моделирования различных возмущений и интеграции с реальными системами автоматизированного управления водохозяйственными объектами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Baratov, R., Chulliyev, Y., & Ruziyev, S. (2021). Smart system for water level and flow measurement and control in open canals. E3S Web of Conferences, 264, Article 04082. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126404082

[2] Kabulov, A., Normatov, I., Seytov, A., & Kudaybergenov, A. (2020). Optimal management of water resources in large main canals with cascade pumping stations. In 2020 IEEE International IOT, Electronics and Mechatronics Conference (IEMTRONICS) (pp. 1–4). IEEE. https://doi.org/10.1109/IEMTRONICS51293.2020.9216402

[3] Kabulov, A. V., Seytov, A. J., & Kudaybergenov, A. A. (2021). Optimal water distribution in large main canals of irrigation system. Global and Stochastic Analysis, 8(3), 45–53.

[4] Rakhimov, S., Seytov, A., & Kudaybergenov, A. (2021). Modeling and optimization of water supply processes at large pumping stations. Global and Stochastic Analysis, 8(3), 57–62.

[5] Rakhimov, S., Seytov, A., Nazarov, B., & Buvabekov, B. (2020). Optimal control of unstable water movement in channels of irrigation systems under conditions of discontinuity of water delivery to consumers. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 883(1), Article 012065. https://doi.org/10.1088/1757-899X/883/1/012065

[6] Rakhimov, S., Seytov, A., Rakhimova, N., & Xonimqulov, B. (2020). Mathematical models of optimal distribution of water in main channels. In 2020 IEEE 14th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT) (pp. 1–4). IEEE. https://doi.org/10.1109/AICT50176.2020.9368798

[7] Rakhimov, S., Seytov, A., Sherbaev, M., Kudaybergenov, A., & Khurramov, A. (2022). Algorithms for solving the problems of optimizing water resources management on a reservoir seasonal regulation. AIP Conference Proceedings, 2432(1), Article 060023. https://doi.org/10.1063/5.0090412

[8] Seytov, A., Abdurakhmanov, O., Kakhkhorov, A., Karimov, D., & Abduraimov, D. (2024). Modeling of two-dimensional unsteady water of movement in open channels. E3S Web of Conferences, 486, Article 01023. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202448601023

[9] Seytov, A., Abduraxmonov, O., Choriyorov, N., & Maxkamov, A. (2024). Development of algorithms for planning and management of water resources in irrigation systems in the conditions of climate changing. Scientific Bulletin: Physical and Mathematical Research, 6(1), 59–67.

[10] Seytov, A. J., Choriyorov, N. Q., & Abdujabborov, Z. A. (2026). Optimization of hydraulic processes in open channels based on deep learning models. Raqamli transformatsiya va sun'iy intellekt ilmiy jurnali, 4(4). https://doi.org/10.5281/zenodo.21912269

[11] Seytov, A., Khusanov, A., Khudayberdiev, A., Uteuliev, N., Yadgarov, S., & Seytimbetov, D. (2024). Development of algorithms for modelling water management processes on main canals. AIP Conference Proceedings, 3147, Article 030032. https://doi.org/10.1063/5.0210329

[12] Seytov, A., Khusanov, A., Khudayberdiev, A., Uteuliev, N., Yadgarov, S., Seytimbetov, D., Ergashev, O., & Abduraxmanov, O. (2024). Development of algorithms for solving problems of optimisation of water resource management in irrigation systems. AIP Conference Proceedings, 3147, Article 030033. https://doi.org/10.1063/5.0210330

[13] Seytov, A., Turayev, R., Jumamuratov, D., & Kudaybergenov, A. (2021). Mathematical models for calculation of limits in water resources management in irrigation systems. In 2021 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICISCT52966.2021.9670304

[14] Seytov, A., Varlamova, L., Bahromov, S., Qutlimuratov, Y., Begilov, B., & Seytimbetov, D. (2024). Optimal management of water resources of large main canals with cascades of pumping stations. AIP Conference Proceedings, 3147, Article 030022. https://doi.org/10.1063/5.0210523

[15] Seytov, A., Varlamova, L., Khudayberdiev, A., Uteuliev, N., Yadgarov, S., & Seytimbetov, D. (2024). Usage of finite element method for modeling two-dimensional unsteady water movement in open channels. AIP Conference Proceedings, 3147, Article 030034. https://doi.org/10.1063/5.0210332

[16] Turaev, R., Seytov, A., Haydarova, R., Abduraxmonov, O., & Choriyorov, N. (2024). Optimal water management in the channels of machine water raise systems. O'zMU xabarlari: Aniq fanlar, (2/1.1), 90–101.

[17] Turaev, R., Seytov, A., Hollozov, B., Haydarova, R., & Kuldasheva, S. (2024). Algorithms for planning water management in irrigation systems. AIP Conference Proceedings, 3045(1), Article 040040.

[18] Turaev, R., Seytov, A., Kuldasheva, S., & Nortojiev, U. (2023). Algorithms for calculating limits in water management in irrigation systems. E3S Web of Conferences, 401, Article 02016. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340102016

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Сейтов, А. Д., Ярашов, И. К., Умарова, Ш. Г., & Чориёров, Н. К. (2026). Системное моделирование и алгоритмизация автоматического управления водораспределением в ирригационном канале. Цифровые технологии в промышленности, 4(3–1). https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3-1.2026.29