

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)

МОЛОДЕЖНАЯ ШКОЛА-СЕМИНАР

по проблемам управления в технических системах
имени А.А. Вавилова

28 мая 2026

СБОРНИК ДОКЛАДОВ



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

**Молодежная школа-семинар
по проблемам управления в технических
системах имени А. А. Вавилова**

28 мая 2026

Санкт-Петербург
2026

УДК 681.5(08)

Библиографическое
описание

Молодежная школа-семинар по проблемам управления в технических системах имени А.А. Вавилова. Ежегод. журн. / Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). Электрон. журн. – Санкт-Петербург: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2026. 50 с. – Режим доступа к журн.: – <https://vavilovschool.etu.ru/assets/files/2026/sbornik.pdf> – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-7629-3668-2

ISBN 978-5-7629-3668-2

© СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2026

Исследование влияния кислорода на очистку в однозонном реакторе по модели ASM2

А. В. Андреев

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

a-sanya01@mail.ru

Аннотация. Приводится и описывается концептуальная модель однозонного реактора на базе ASM2 вместе с результатами компьютерного моделирования. В ходе анализа результатов установлено, что изменением концентрации кислорода на входе однозонного реактора не достичь очистки по фосфору и азоту, однако можно влиять на связанный с ними ряд параметров.

Ключевые слова: фосфор; кислород; модель ASM2; азот

I. ВВЕДЕНИЕ

Представленная на предприятии «ИДАВАНГ Агро» система очистки сточных вод является эффективной, поскольку содержание загрязняющих веществ на ее выходе не превышает предельно-допустимых концентраций (далее ПДК). Сама система выделяет в атмосферу здания аммиак, который оказывает негативное влияние на элементы системы, в т. ч. выводя их из строя. Данная система описана в [1].

При использовании метода биологической очистки влияние аммиака исключено. Потому было принято решение изучить перспективу ее применения на предприятии через математическое моделирование на основе данных о составе стоков с использованием семейства моделей активного ила (Activated Sludge Models, или ASM). В ходе исследования по модели ASM1 было установлено, что при применении биологической очистки можно достигать содержания аммонийного и нитратного азота в сбрасываемой воде в пределах ПДК за счет применения трехзонного реактора ДНД-типа с мембранным блоком. Также было выяснено, что при изменении параметров сточных вод (действия возмущений) можно сохранять азот в пределах ПДК на выходе реактора посредством рассмотрения системы регулирования. Подробно данные результаты изложены в [2] и [3].

Однако сама модель ASM1 не рассматривает в ходе очистки фосфорные загрязнения, что учтено текущей системой на предприятии. С целью исследования биоочистки от фосфора возникает задача перехода к применению модели ASM2. Сама задача будет решаться через анализ результатов моделирования. Данное исследование уже было проведено ранее в [4]. Было установлено, что модель ASM2 из подобранной литературы не рассматривала процессы ферментации и гидролиза, в отличие от трудов авторов модели, приведенных в [5]. Потому на основе исходного описания ASM2 было решено начать заново построение модели биореактора с этапа изучения как самой ASM2, так и построения концептуальной модели реактора.

II. Модель ASM2

Основная проблема модели ASM2 – ее размер. Так, если модели ASM1 и ASM3 рассматривают 8 и 12 реакций, соответственно, то у ASM2 их 19. Сами авторы связывают данное усложнение с необходимостью учитывать в системе фосфор. Таким образом, модель ASM2 применяется в моделировании биологической очистки реже, чем ASM1 и ASM3.

Все модели семейства ASM описаны в форме матричного представления, по которому составляются нелинейные дифференциальные уравнения. Ввиду ограничений по объему в настоящей статье не приводится описание матричного представления или комментарии по нему, однако вся информация изложена авторами моделей в [5] при описании ASM1 и ASM2.

III. КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ASM2

A. Основные процессы, протекающие в реакторе

Представленные в модели ASM2 процессы можно разделить на 5 групп – гидролиза, гетеротрофных организмов, фосфат-аккумулирующих организмов (далее ФАО), автотрофных организмов или организмов нитрификации, и осаждения фосфора.

Процессы гидролиза разделяются на три вида в зависимости от условий протекания: аэробный ($S_{O_2} > 0$), анакисный ($S_{O_2} \approx 0$, $S_{NO_3} > 0$) и анаэробный ($S_{O_2} \approx 0$, $S_{NO_3} \approx 0$).

Процессы гетеротрофных организмов отвечают за их лизис (X_H), гидролиз медленно-разложимого вещества X_S , аэробное разложение ферментирующих органических субстратов S_F и продуктов ферментации S_A (аэробный рост), анакисное окисление S_F и S_A , восстановление нитратного азота S_{NO_3} до азота S_{N_2} (денитрификация) и анаэробную ферментацию S_F до S_A .

Процессы ФАО отвечают за их рост (X_{FAO}), хранение их внутриклеточных продуктов X_{PHA} , полифосфатов X_{PP} , и их лизис (X_{PHA} , X_{PP} и X_{FAO}). Важно отметить, что данная группа процессов в рамках модели ASM2 позволяет только предсказывать очистку биологического фосфора и не включает все наблюдаемые явления реального процесса с целью упрощения. Также ASM2 допускает, что ФАО не проходят через процесс денитрификации и растут только на внутриклеточных продуктах.

Процессы автотрофных организмов или нитрификации отвечают за их рост и лизис (X_{AUT}). Полагается, что нитрификация происходит одноэтапно – от аммонийного азота S_{NH_4} к нитратному S_{NO_3} , без участия нитрита, поскольку в ASM2 он исключен из процессов денитрификации.

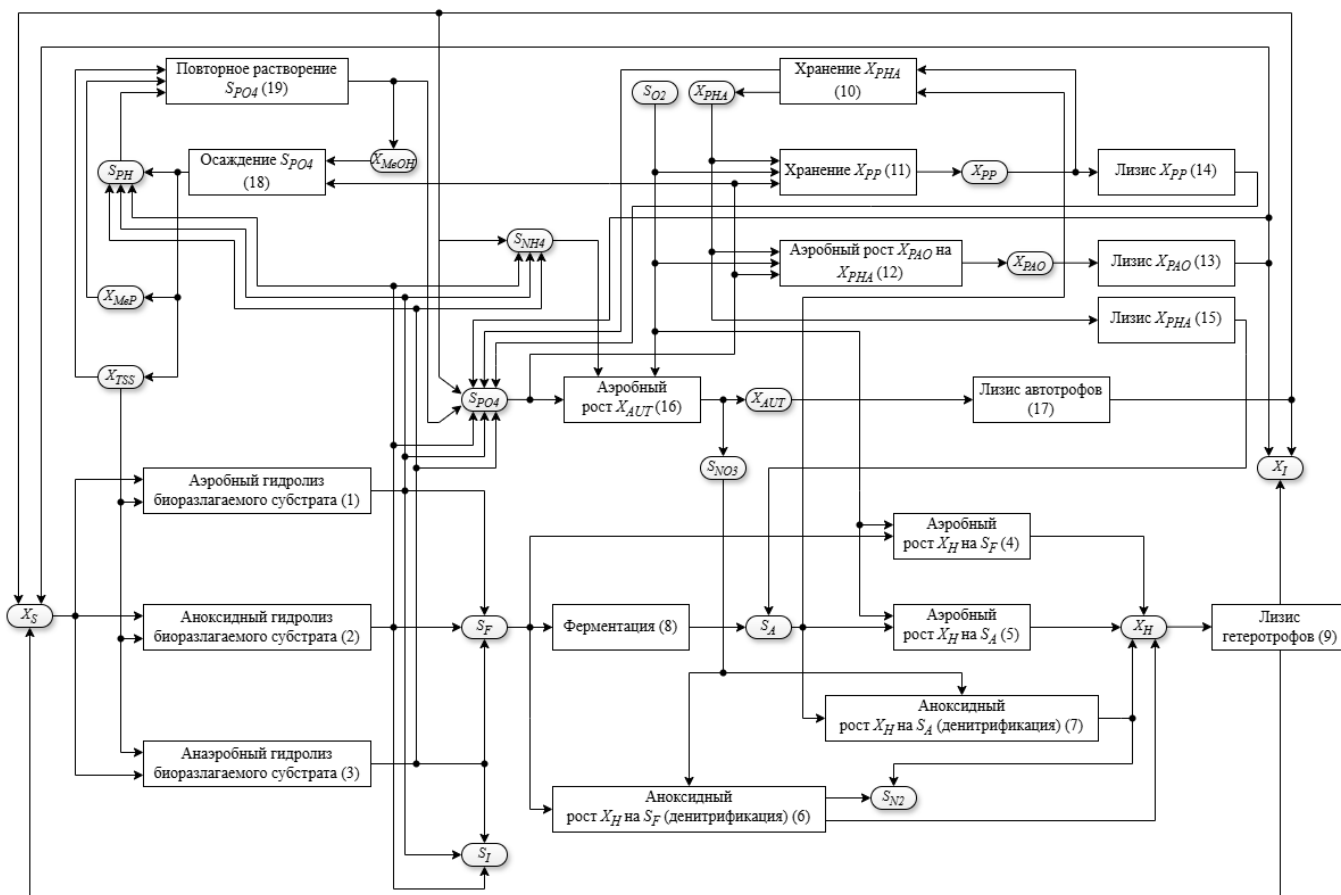


Рис. 1. Концептуальная модель ASM2

Процессы осаждения фосфора отвечают за осаждение и повторное растворение неорганического фосфора S_{PO4} . Данная группа процессов включена в модель, поскольку в системах биологической очистки через питание присутствующие в сточной воде металлы вместе с высокой концентрацией освобожденного S_{PO4} приводят к химическому осаждению фосфора. Допускается исключение данной группы процессов в случае отсутствия необходимости их моделирования.

В. Предполагаемая и исследуемая на данный момент конструкции реактора

Поскольку при исследовании на модели ASM1 было выяснено, что удовлетворительная очистка от азота достижима только при применении реактора ДНД-типа с мембранным блоком, то можно ожидать использование подобной конструкции и при применении модели ASM2. Однако возможен выбор и в сторону иных вариантов конструкций, поскольку сам учет фосфора позволяет уточнить детали процесса, которые на основе модели ASM1 не проявлялись. На текущий момент с целью исследования процессов модели ASM2 рассматривается однозонный реактор.

С. Концептуальная модель

На основе вышеописанных фактов и за счет информации по конверсионным факторам и стехиометрическим коэффициентам из [5] была построена концептуальная модель ASM2, представленная на рис. 1.

На данном рисунке реакции 1-3 относятся к процессам гидролиза, реакции 4-9 – к процессам

гетеротрофных организмов, реакции 10-15 – к процессам ФАО, реакции 16-17 – к процессам автотрофов, а реакции 18-19 – к процессам осаждения фосфора. Входящая связь от реакции к веществу означает его повышение в ходе данной реакции, исходящая же связь – наоборот, понижение.

Стоит выделить концентрации растворенного кислорода S_{O2} , неорганического фосфора S_{PO4} и азота S_{N2} . Как можно наблюдать по концептуальной модели, кислород S_{O2} участвует только в исходящих связях, т. е. в рамках модели ASM2 растворенный кислород претерпевает только понижение. Таким образом, в теории можно воздействовать на процессы в системе за счет дополнительной подачи в рассматриваемый реактор кислорода для управления поведением процессов, как это можно было делать в моделях на основе ASM1. Причем сам кислород взаимодействует вместе с аммонийным азотом S_{NH4} и неорганическим растворенным фосфором S_{PO4} в ходе реакции «Аэробный рост X_{AUT} », приводя к повышению в системе нитратного азота S_{NO3} , который уже в свою очередь в ходе реакций аноксидного роста гетеротрофов на S_F и S_A приводит к повышению азота S_{N2} . Сам азот S_{N2} участвует только в данных двух реакциях, таким образом его концентрация в системе претерпевает только рост. Неорганический фосфор S_{PO4} является центральным элементом для исследования очистки, участвуя в 11 реакциях (8 входящих и 3 исходящих), а его ПДК составляет 3.5 г/м³.

IV. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

С целью проверки полученных по концептуальной модели положений на основе данных из [5] и по ПДК из

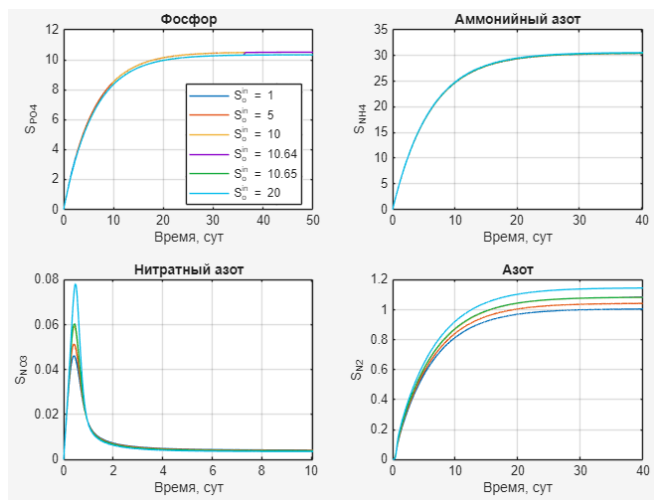


Рис. 2. Результаты моделирования по фосфору и разным видам азота

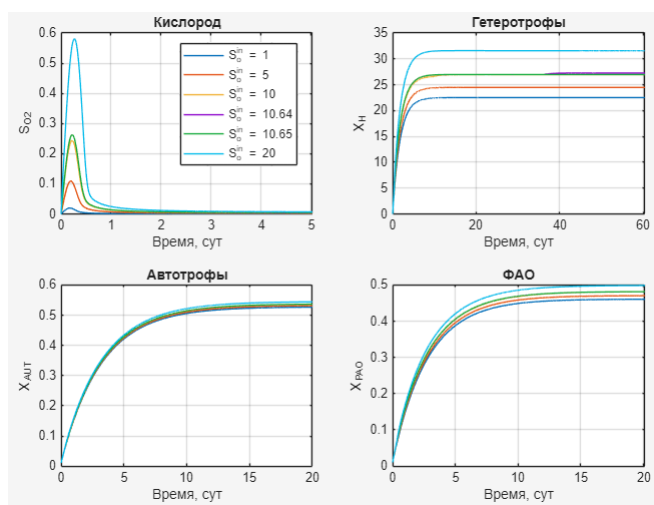


Рис. 3. Результаты моделирования по кислороду и организмам ила

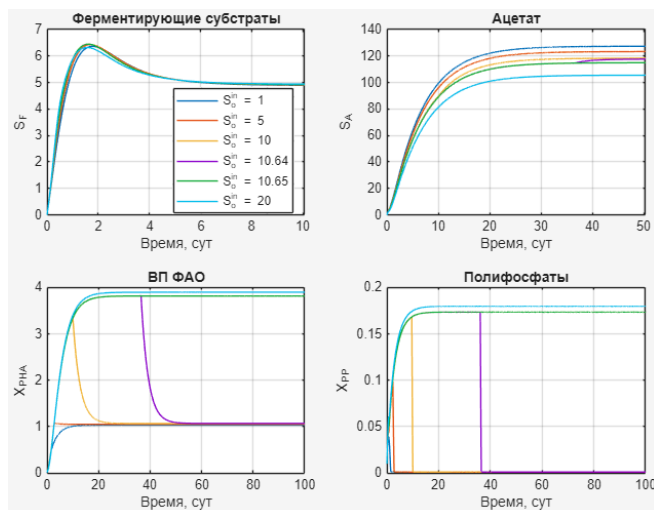


Рис. 4. Результаты моделирования по иным компонентам

[6] была построена компьютерная модель ASM2 в среде Simulink. Результаты моделирования при различных концентрациях кислорода в стоках приведены на рис. 2–4.

На рис. 2 можно наблюдать, что изменение концентрации кислорода на входе реактора не приводит к изменению основных загрязняющих веществ, а именно

неорганического фосфора S_{PO4} , аммонийного азота S_{NH4} и нитратного азота S_{NO3} . В случае неорганического фосфора и аммонийного азота оба вещества в ходе очистки достигают и даже превышают уровень концентраций, которые они имеют на входе реактора, т. е. очистки по данным веществам не происходит (фосфор – 10 г/м³ против ПДК в 3.5 г/м³, аммонийный азот – 30 г/м³ против ПДК в 2 г/м³). Вместе с тем, удастся понизить концентрацию нитратного азота S_{NO3} – пока на входе его концентрация составляет 1 г/м³, на выходе реактора она уже менее 0.01 г/м³. Однако концентрация нитратного азота в стоках уже ниже ПДК (для нитратного азота ПДК составляет 10 г/м³). Таким образом очистки по нему не требуется. Также изменение концентрации кислорода не оказывает влияние на уменьшение нитратного азота в установившемся режиме, оказывая влияние только на переходный процесс, в ходе которого концентрация нитратного азота становится больше с повышением кислорода на входе. Наконец, присутствует влияние кислорода на азот S_{N2} , который повышается и в переходном процессе, и в установившемся режиме. Причем, согласно концентуальной модели, азот S_{N2} образуется путем восстановления от именно нитратного азота S_{NO3} , на который, как установлено, влияние кислорода минимально. Таким образом возможно, что повышение азота S_{N2} происходит за счет взаимодействия нитратного азота с ацетатом S_A , который действительно изменяется при повышении кислорода на входе согласно рис. 4.

По рис. 3 видно, что при повышении кислорода на входе реактора его концентрация S_{O2} в самом реакторе претерпевает рост, но только в течение первых 12 часов процесса, затем концентрация в любом случае снижается до околонулевой к концу вторых суток. Причем повышения кислорода в реакторе в первые 12 часов оказывается достаточно для повышения концентрации азота S_{N2} (рис. 2), гетеротрофов X_H и ФАО X_{FAO} , незначительного повышения концентрации автотрофов X_{AUT} (рис. 3) и снижения концентрации ацетата S_A (рис. 4).

Что же касается влияния кислорода на Внутриклеточные Продукты ФАО (далее ВП ФАО) X_{RNA} и полифосфаты X_{PP} на рис. 4, то они также претерпевают повышение, но не на всем диапазоне значений кислорода в стоках. Так, при входной концентрации кислорода S_{O2}^{IN} менее 5 г/м³, ВП ФАО всегда устанавливается на уровне в 1 г/м³, а полифосфаты уменьшаются до нуля. В диапазоне S_{O2}^{IN} между 5 и 10.64 г/м³, и ВП ФАО, и полифосфаты претерпевают временный рост до определенных значений (которые притом не изменяются при повышении входного кислорода в данном диапазоне) и, затем, снижаются до 1 г/м³ (ВП ФАО) и нуля (полифосфаты). Тех же уровней, которых они сразу достигали при низких концентрациях кислорода на входе. Однако видна закономерность, чем выше концентрация кислорода после 5 г/м³, тем позже будет наблюдаться снижение. Причем даже незначительное повышение концентрации кислорода на входе приводит к тому, что момент снижения наступает позже. Например, если при $S_{O2}^{IN} = 10.64$ г/м³ снижение происходит между 30 и 40 сутками, то уже при $S_{O2}^{IN} = 10.65$ г/м³ его не происходит в течение 3х месяцев (на практике в течение 3х месяцев процессы в системе изменяются по другим причинам). Дальнейшее повышение кислорода в стоках, выше указанного

диапазона, приводит также к дальнейшему повышению ВП ФАО и полифосфатов в установившемся режиме.

Важно отметить, что влияние данного феномена также сказывается на концентрациях ацетата S_A (рис. 4), гетеротрофов X_H (рис. 3) и неорганического фосфора S_{PO4} (рис. 2). Все они при $S_{O_2}^{IN} = 10.64 \text{ г/м}^3$ претерпевают изменение между 30 и 40 сутками.

Таким образом, изменяя концентрацию кислорода на входе можно добиваться повышения следующих концентраций – Внутриклеточных Продуктов ФАО X_{PHA} , полифосфатов X_{PP} , ФАО X_{PAO} , гетеротрофов X_H , автотрофов X_{AUT} , ацетата S_A и азота S_{N_2} . Причем в случае Внутриклеточных Продуктов ФАО и полифосфатов требуется концентрация кислорода на входе как минимум в 10.65 г/м^3 для их постоянного повышения, иначе в течение первого месяца работы системы произойдет их снижение до прежнего уровня, что в свою очередь скажется на концентрациях неорганического фосфора S_{PO4} , гетеротрофов X_P и ацетата S_A , пусть и незначительно.

К сожалению, невозможно достигать или как-либо изменять прямую результат очистки от самого фосфора (S_{PO4}), аммонийного и нитратного вида азотов (S_{NH_4} и S_{NO_3}). То есть изменение кислорода в однозонном реакторе нельзя рассматривать как основное средство изменения уровней фосфора и азота на выходе реактора, но допустимо использовать в дальнейшем как вспомогательный инструмент для управления определенными концентрациями в системе или прогнозирования влияния его изменения (что в рассматриваемой модели принимается как возмущение) на них.

Разумеется, в дальнейшем при рассмотрении иных конструкций реактора возможно изменение положений. Например, так было в случае ASM1, где однозонного реактора для очистки стоков было недостаточно, что отражено в [2] и [3].

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования была построена концептуальная и компьютерные модели однозонного реактора на основе ASM2, рассмотрено влияние кислорода на входе

реактора на поведение процессов в системе. Выяснено, что можно использовать кислород на входе реактора как вспомогательный инструмент при необходимости управления концентрациями (или их прогнозирования) Внутриклеточных Продуктов ФАО X_{PHA} , полифосфатов X_{PP} , гетеротрофов X_H , автотрофов X_{AUT} , ацетата S_A и азота S_{N_2} . Однако применять кислород как основное средство управления интересующими концентрациями неорганического фосфора S_{PO4} , аммонийного азота S_{NH_4} и нитратного азота S_{NO_3} в однозонном реакторе недопустимо, поскольку кислород или не приводит к изменению их концентраций, или приводит к их повышению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Андреев А.В. Система очистки сточных вод на предприятии ИДАВАНГ Агро // Молодежная школа-семинар по проблемам управления в технических системах имени А.А. Вавилова [Электрон. журн.]. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2021. С. 8-11. Режим доступа к журн. – https://vavilovschool.etu.ru/assets/files/2021/sbornik_2021.pdf (дата обращения 29.04.2026)
- [2] Андреев А.В., Грудяева Е.С., Душин С.Е. Исследование биологической очистки на предприятии «ИДАВАНГ Агро» по компьютерным моделям // Системный синтез и прикладная синергетика: Сб. науч. работ XI Всероссийской науч. Конф., Нижний Архыз, 27 сентября – 01 октября 2022 года. Нижний Архыз, 2022. С. 16-21. doi:10.18522/syssyn-2022-2
- [3] Андреев А.В., Грудяева Е.С., Душин С.Е. Исследование управления процессами биологической очистки на предприятии «ИДАВАНГ Агро» // Системный синтез и прикладная синергетика: Сб. науч. работ XII Всероссийской науч. Конф., Нижний Архыз, 23-29 сентября 2024 года. Нижний Архыз, 2024. С. 18-25. doi: 10.18522/syssyn-2024-2
- [4] Андреев А.В. Исследование процессов активного ила при очистке от фосфора по модели ASM2 // Сборник докладов VI Международной научной конференции по проблемам управления в технических системах (ПУТС-2025), Санкт-Петербург, 26 – 28 сентября 2025 г. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2025. С. 285-288. – Режим доступа к журн. – <https://cts.etu.ru/assets/files/2025/sbornik/285-288.pdf> (дата обращения 29.04.2026)
- [5] Henze M., Gujer W., Mino T., van Loosdrecht M. Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3. London: IWA Publishing, 2000. 121 p. doi:10.2166/9781780402369
- [6] ГОСТ 16887-71. Разделение жидких неоднородных систем методами фильтрования и центрифугирования. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1986

Сравнительный анализ аддитивного управления ростом опухоли: химиотерапия и иммунотерапия в рамках распределённой МОДЕЛИ

С. Р. Гасимова

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

gasymova2289@gmail.com

Аннотация. Работа посвящена математическому моделированию управляемого роста солидной опухоли с учетом иммунного ответа. На основе распределенной модели взаимодействия опухолевых клеток и лимфоцитов исследованы две стратегии разомкнутого аддитивного управления: химиотерапия (постоянный отток клеток) и иммунотерапия (постоянный приток лимфоцитов). Управляющее воздействие подается в форме прямоугольного импульса. Численно определены пороговые дозы и минимальные длительности импульсов, обеспечивающие полное подавление опухоли.

Ключевые слова: математическая модель; опухоль; иммунотерапия; химиотерапия; разомкнутое управление; критическая доза; пороговый эффект

I. ВВЕДЕНИЕ

Прогрессия злокачественных новообразований во многом определяется балансом между пролиферацией опухолевых клеток и активностью иммунной системы. Математические модели позволяют формализовать этот баланс и количественно оценить эффективность различных способов терапевтического вмешательства [1–3]. Среди распределенных моделей широкое признание получили системы «реакция–диффузия–адвекция», восходящие к работам Фишера и Колмогорова и обобщенные в трехкомпонентной модели Жуковой–Колпак [4], использованной в данной работе. Входящая в нее двухкомпонентная подсистема, описывающая взаимодействие делящихся клеток u_1 и лимфоцитов u_4 , является удобным полигоном для исследования принципов управления опухолевым ростом.

Цель настоящей статьи – сравнительный анализ двух простейших стратегий разомкнутого аддитивного управления: химиотерапии, моделируемой постоянным оттоком опухолевых клеток, и иммунотерапии, моделируемой постоянным притоком лимфоцитов. Управление подается в виде прямоугольного импульса конечной амплитуды и длительности, что соответствует клинической практике курсового лечения.

II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИММУНОТЕРАПИИ

Рассматривается система двух дифференциальных уравнений в частных производных, описывающая динамику делящихся клеток $u_1(t, x)$ и лимфоцитов $u_4(t, x)$ на отрезке $[0, L]$ [4]:

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} = D_1 \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} + \mu_1 u_1 - \gamma_{12} u_1 u_4,$$

$$\frac{\partial u_4}{\partial t} = D_4 \frac{\partial^2 u_4}{\partial x^2} - v \frac{\partial u_4}{\partial x} - \gamma_{21} u_1 u_4,$$

где D_1, D_4 – коэффициенты диффузии; μ_1 – скорость пролиферации опухоли; γ_{12}, γ_{21} – константы цитотоксичности и истощения лимфоцитов; v – скорость адвективного переноса иммунных клеток.

Используются граничные условия Неймана (нулевые потоки), что отвечает изолированной ткани. Начальная концентрация опухолевых клеток задается в виде малого гауссова импульса в центре отрезка, имитирующего спонтанное возникновение микроочага; лимфоциты распределены однородно с начальной концентрацией u_4^{init} .

Порог бифуркации, разделяющий подавление опухоли и ее неограниченный рост, определяется условием $u_4^{\text{init}} = \mu_1 / \gamma_{12} \approx 0.933$ (при $\mu_1 = 1.4 \text{ год}^{-1}$, $\gamma_{12} = 1.5$). При более слабом иммунитете формируется устойчивый локализованный очаг колоколообразной формы.

III. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ

В уравнения вводятся аддитивные управляющие члены. Для химиотерапии в первое уравнение добавляется постоянный отток $-k_1 u_{\text{ctrl}}$, для иммунотерапии во второе – постоянный приток $+k_2 u_{\text{ctrl}}$. Управляющий сигнал u_{ctrl} действует в течение времени t (длительность импульса) и имеет амплитуду A . По окончании импульса система эволюционирует свободно до $T = 40$ лет.

Эффективность лечения оценивается по двум критериям: положению фронта инвазии (расстояние, пройденное фронтом за 40 лет) и максимальной концентрации опухолевых клеток. Полное подавление диагностируется при $\max u_1 < 10^{-3}$.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

A. Химиотерапия

При $k_1 = 0.0004$ для всех трех рассмотренных начальных уровней лимфоцитов ($u_4^{\text{init}} = 0.2, 0.4, 0.6$)

обнаружена пороговая доза, выше которой опухоль полностью уничтожается. Важно, что произведение $k_1 A \tau$ (суммарная экспозиция) сохраняется практически постоянным: для $u_4^{\text{init}} = 0.2$ полный ответ достигается при $A = 0.4$ и $\tau = 11$ мес., а также при $A = 1.0$ и $\tau = 4$ мес. (доза $\approx 1.3 \cdot 10^{-4}$). С ростом начального иммунитета требуемая доза немного снижается. Таким образом, амплитуда и длительность взаимозаменяемы: короткий интенсивный курс эквивалентен продолжительному низкодозовому. С позиций теории управления это характерно для систем с аддитивным оттоком без внутреннего механизма восстановления после отмены воздействия.

В. Иммуноterapia

При $k_2 = 0.2$ короткие импульсы (до одного года) неэффективны при низком иммунитете. Для $u_4^{\text{init}} = 0.2$ даже $A = 1.0$ и $\tau = 12$ мес. снижают $\max u_1$ лишь от 2.4×10^{18} до 1.2×10^{18} . Для преодоления порога $\mu_1/\gamma_{12} \approx 0.933$ требуется накопить лимфоциты, на что необходимо время порядка $\Delta u_4/(k_2 A)$. При $A = 1.0$

идеальное время составляет около 3.7 лет; реальное, с учетом потерь – 20–25 лет. При $u_4^{\text{init}} = 0.4$ и $A = 0.8$ критическая длительность сокращается до ≈ 2.5 лет, а при $u_4^{\text{init}} = 0.6$ – менее двух лет. Динамика концентрации u_1 демонстрирует выраженный отсроченный эффект, типичный для систем с интегральным управлением: уравнение для u_4 содержит накопление управляющего сигнала.

На рис. 1, 2 представлены трехмерные поверхности, иллюстрирующие зависимость исхода от амплитуды и длительности.

С. Сопоставление стратегий

Химиотерапия обеспечивает быстрый ответ, но требует точного соблюдения дозы; иммуноterapia инерционна, однако после преодоления порога может давать длительную ремиссию. Комбинация методов обещает синергетический эффект: химиотерапия быстро уменьшает массу опухоли, а иммуноterapia предотвращает рецидив. Качественно близкие выводы о пороговом характере терапии получены в работах [5, 6].

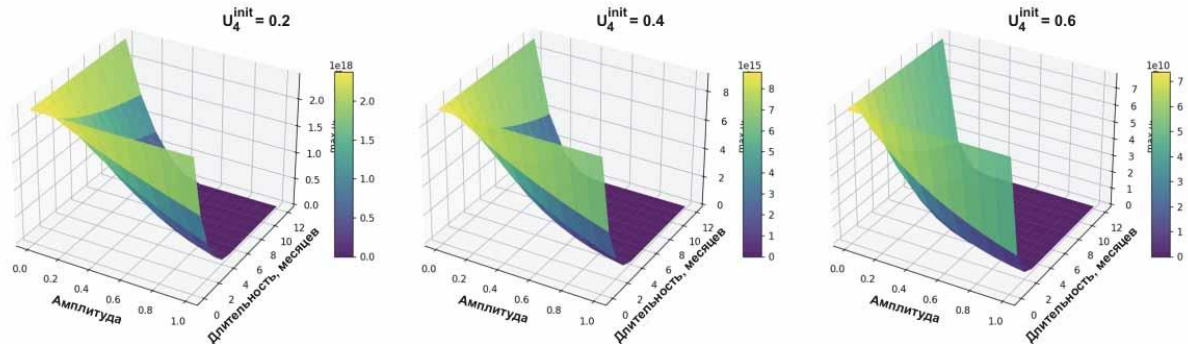


Рис. 1. Химиотерапия

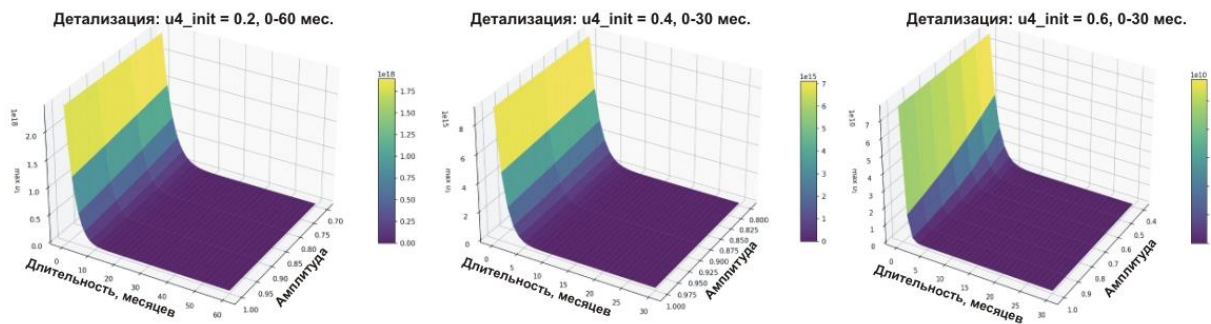


Рис. 2. Иммуноterapia

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование подтверждает, что аддитивное разомкнутое управление в рамках распределенной модели позволяет выявить принципиальные различия между химио- и иммунотерапией. Определены критические дозы и длительности, необходимые для полного ответа. Полученные пороговые комбинации могут служить основой для индивидуализированного планирования терапии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Byrne H.M., Breward C.J.W., Lewis C.E. The role of cell-cell interactions in a two-phase model for avascular tumour growth // Journal of Mathematical Biology. 2001. P. 1–30.

[2] Kolobov A.V., Gubernov V.V., Polezhaev Andrey A. Autowaves in a model of invasive tumor growth // Biophysics. 2009. C. 232–237.
 [3] Murphy H., Jaafari H., Dobrovolny H.M. Differences in predictions of ODE models of tumor growth: a cautionary example // BMC Cancer. 2016.
 [4] Жукова И.В., Колпак Е.П. Математические модели злокачественной опухоли // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 10. 2014. № 3. С. 5–18.
 [5] Drexler D.A., Nagy I., Romanovski V. Bifurcations in a closed-loop model of tumor growth control // 2021 IEEE 21st International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI). Budapest, Hungary, 2021.
 [6] Русаков С.В., Чирков М.В. Математическая модель влияния иммунотерапии на динамику иммунного ответа // Проблемы управления. 2012. С. 45–50.

Внедрение системы автономного движения в серийный автомобиль

Е. И. Елисеев

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

emelrobot@yandex.ru

Д. М. Филатов

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

dmfilatov@etu.ru

Аннотация. С развитием беспилотного движения всё более важной задачей становится разработка автономных систем управления. Данные системы должны легко встраиваться в серийный автотранспорт, обеспечивать точное, своевременное регулирование и иметь системы передачи управления водителю в нештатных ситуациях. В данной работе рассмотрено построение системы автономного движения на базе серийного электромобиля Gazelle e-NN. Система разрабатывается с применением промышленных решений и рассчитывается на длительную безотказную работу. Особое внимание уделяется системе выхода из аварийного режима. Также в работе представлены основные аспекты программирования ПЛК для целей автономного движения.

Ключевые слова: программируемый логический контроллер, беспилотный транспорт, системы безопасности, ROS

I. ОПИСАНИЕ ЗАДАЧИ

В современном мире активно развивается беспилотный транспорт. Часто систему автономного движения устанавливают на серийный автомобиль, специально разработанный под эту задачу. Более сложная задача – обеспечить автономное движение транспортного средства, не предназначенного для автономного движения.

В данной работе рассматривается реализация системы беспилотного управления серийным электромобилем Gazelle e-NN (рис. 1).



Рис. 1. Gazelle e-NN

Данный автомобиль имеет массу более 3,5 тонн, тяговый двигатель мощностью 100 кВт, аккумуляторную батарею ёмкостью 48 кВт·ч и напряжением 346 В. Габаритные размеры представлены на рис. 2 [1]. Из приведённых характеристик следует, что объект управления требует особого подхода к разработке систем. Стоит учитывать динамические характеристики,

повышенное требование к устойчивости и быстродействию систем. Также особое внимание необходимо уделить системе безопасности, аварийного останова и выхода из беспилотного режима.

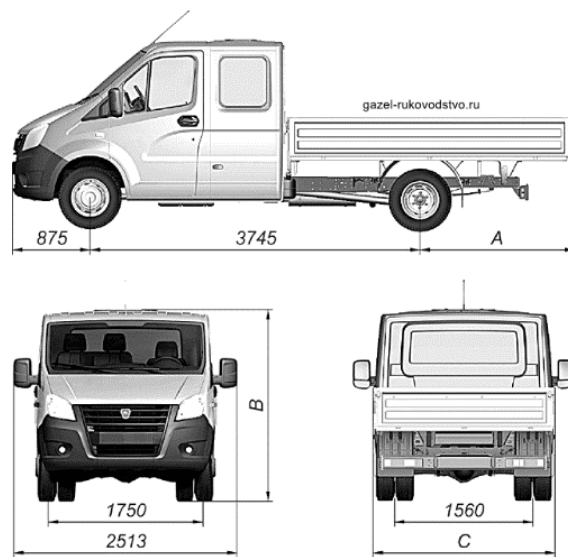


Рис. 2. Габаритные размеры

II. СТРУКТУРА СИСТЕМЫ

При разработке системы автоматического управления первым шагом является определение структуры управляющей системы. Представленная в данной статье система состоит из двух подсистем: верхнего и среднего уровней. Верхний уровень реализуется на ЭВМ посредством применения Robot Operation System (ROS). Это открытый пакет модульной операционной системы для работы с высокоуровневыми алгоритмами обработки данных и планирования действий автономной системы. Средний уровень реализуется на промышленном логическом контроллере (ПЛК) Delta AS228P-A. ПЛК был выбран из-за надёжности промышленных решений и их модульности. Для управления основными органами управления автомобиля (тормозная педаль и рулевая система) используются промышленный электропривод также от компании Delta. Связь между ПЛК и ПЧ происходит с помощью протокола CANopen. Для управления педалью газа используются промышленные ЦАП и АЦП ТМА-102 и ТМА-301, соответственно. Блок-схема системы управления представлена на рис. 3. Пунктирной линией отделены система управления и объект управления.

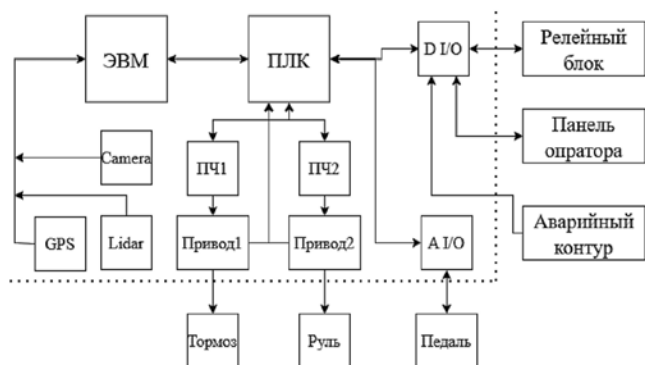


Рис. 3. Структура системы управления

III. БЛОК УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ ДВИЖЕНИЯ

Для задания скорости перемещения в электротранспорте используются педали газа и тормоза. В используемом в данной статье транспортном средстве установлена гидравлическая тормозная система с прямой передачей воздействия и блоком ABS. На колёсах установлены инкрементальные энкодеры без

возможности определения направления вращения колёс. Для подачи ускоряющего воздействия используется двухканальная электронная аналоговая педаль акселератора.

Для подачи тормозного воздействия к педали тормоза с помощью тросика подключён электропривод, мощность которого выбрана с запасом.

Эмулирование акселерационного воздействия производится с помощью блока ЦАП. Так как аналоговый сигнал с педали газа двухканальный, то необходим двухканальный ЦАП.

Для определения структуры регулятора была разработана качественная математическая модель скоростных характеристик транспорта (рисунок 4). Разработать количественную модель на данный момент не представляется возможным из-за отсутствия специальных стендов, приборов и трека для экспериментального определения динамических параметров системы управления электродвигателем. Также в модели учтён селектор направления движения автомобиля.

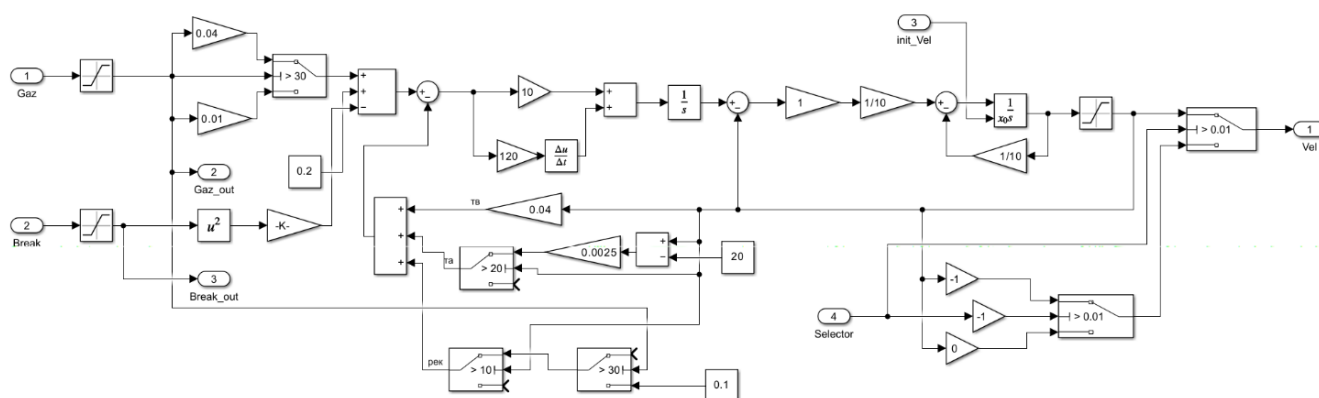


Рис. 4. Математическая модель контура скорости автомобиля

Для управления скоростью движения используется три регулятора: ПИД для разгона, П для торможения рекуперацией и ПИД для торможения педалью тормоза. Так как управление педалью газа при разгоне и торможении значительно различается в виду наличия торможения рекуперацией, которое активируется в

положении педали менее 30 процентов от максимума и скорости более 10 км/ч. Поэтому реализована система с переключением регуляторов в зависимости от разности, заданной и текущей скоростей. Также приведены результаты моделирования торможения со скорости 100 км/ч до 20 км/ч (рис. 5).

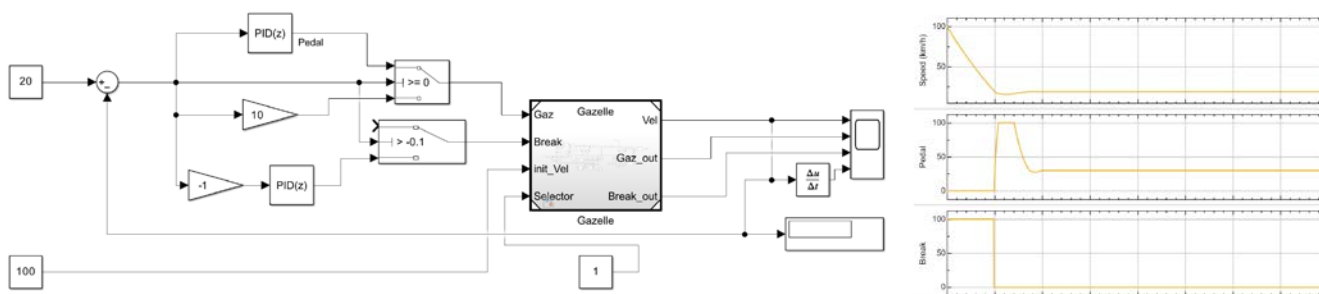


Рис. 5. Математическая модель системы регулирования и результаты моделирования

Для получения обратной связи по скорости используем сигналы с датчика ABS. Он представляет собой инкрементальный однофазный энкодер. Датчик питается от 12 В, а выходной сигнал составляет 0,7 В при низком уровне и 1,4 В при высоком. Так как ПЛК

имеет напряжение цифровых входов 24 В необходимо разработать плату преобразования уровней, для этого используем компаратор с биполярным транзистором. Принципиальная схема платы приведена на рис. 6. С помощью подстроечного резистора R2 подадим на

вход IN – напряжение 1 В. Также подтянем эмиттер транзистора к земле с помощью резистора R1.

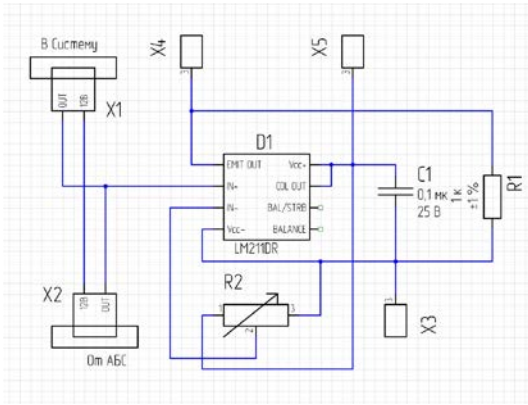


Рис. 6. Принципиальная схема платы преобразования уровней

IV. БЛОК УПРАВЛЕНИЯ РУЛЕВОЙ СИСТЕМОЙ

Для передачи управляющего воздействия на рулевое колесо используем электропривод с редуктором. Так как рулевая система данного транспорта имеет сложное устройство (рис. 7 [2]), то единственно возможное место установки привода находится на рулевом валу рулевой колонки. Также учтём необходимость быстрого демонтажа данной системы в виду необходимости использования транспортного средства на дорогах общего пользования, где на данный момент запрещено несанкционированное автономное движение.

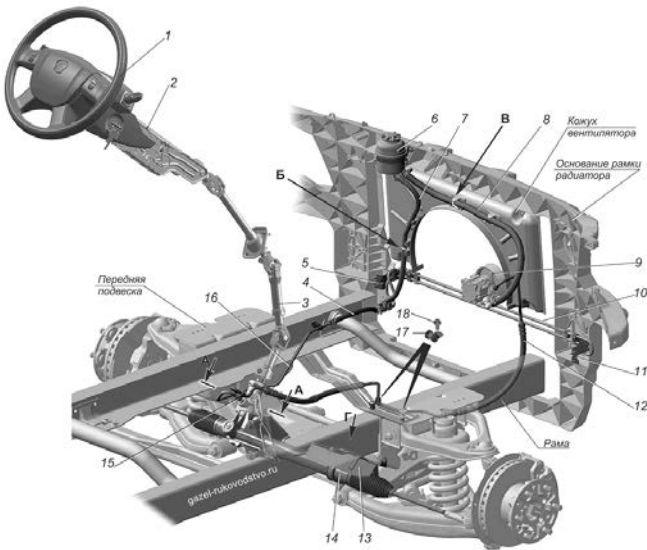


Рис. 7. Рулевая система

Передачу момента от электропривода с редуктором осуществим с помощью шестерной передачи (рис. 8). Для уменьшения люфта зубья шестерней выполнены по эвольвенте. В дальнейшем планируется изготовление безлюфтовых передач.



Рис. 8. Крепление рулевого привода

Точное задание угла поворота колёс реализуется несколькими способами. Так как установка датчика угла поворота передних колёс крайне затруднительна, реализуются следующие методы получения угла поворота: по разности скоростей левого и правого колеса и относительно по углу поворота рулевого вала. Первый метод даёт очень точные результаты, но неэффективен на малых скоростях. Второй, наоборот, достаточно неточный из-за суммарных люфтов рулевой системы, но позволяет управлять положением колёс при малой скорости. Поэтому будем переключаться между этими режимами в зависимости от модуля скорости. При тестировании системы будет установлено точное значение. В дальнейшем планируется разработать адаптивный регулятор для максимально точного управления углом поворота.

V. СИСТЕМА ВЫХОДА ИЗ АВТОНОМНОГО ДВИЖЕНИЯ

Так как автомобиль является средством повышенной опасности, на данный момент законодательства всех стран мира запрещают свободное движение по дорогам общего пользования автономного транспорта без водителя. Он должен следить за ситуацией на дороге и при неправильных действиях автономной системы брать управление на себя, тем самым предупреждая аварийную ситуацию. От удобства передачи прав управления зависит безопасность всех участников движения. Поэтому разработка системы «перехвата» крайне важна для беспилотных транспортных средств.

В автомобиле, исследуемом в данной статье, как уже было приведено ранее, расположены три органа управления движением: рулевое колесо, педали газа и тормоза. Рассмотрим реализацию системы безопасности для каждого из них.

A. Рулевое колесо

В системе автоматического управления, разработанной нами, передача момента на рулевой вал происходит напрямую от привода. Так как выбранный привод имеет значительное усилие, то водитель не имеет возможности изменить угол поворота руля при работающем автономном движении. Необходимо отслеживать воздействие со стороны водителя. Для этого можно выделить минимум 3 способа. Первый – с помощью кнопок на рулевом колесе, которые водитель жмёт, когда собирается произвести манёвр. Данный способ достаточно удобен, но требует разработки

собственного рулевого колеса. Второй метод – получение данных с обратной связи по току привода. Но так как при движении по дорогам с неидеальным покрытием момент, необходимый приводу для удержания нужного угла поворота, будет значительно меняться, становится невозможным точное определение воздействия со стороны водителя. Третий метод – получение вращательного момента со стороны водителя посредством определения угла скручивания рулевого вала. Данный метод планируется использовать в данном проекте. Подробно он описан в статье [3].

В. Педаль тормоза

Для определения воздействия водителя на педаль тормоза удобно использовать тензометрический датчик, установленный на поверхность педали.

С. Педаль газа

Так как педаль газа электронная, что значительно упрощает работу с ней, то условием для переключения системы безопасности будет являться отклонение выходного напряжения одного из каналов от значения, соответствующего отпущенной педали. Для этого устанавливается блок АЦП.

По срабатыванию любого из сигналов безопасности система выходит из режима автономного движения, а именно, размыкаются питающие провода приводов и выключается эмуляция педали акселератора.

VI. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ПЛК

Разработка программы для ПЛК является важным этапом создания автономной системы. Для системы управления транспортным средством критично быстродействие и точность работы. Поэтому программы управления внешними устройствами, а также получения и обработки данных должны работать асинхронно и гарантировать устойчивую работу системы. Важно иметь возможность быстро оценивать работу системы на предмет ошибок. Для этого необходимо разрабатывать модульные системы с блоками контроля параметров. Так, например, на рис. 9 приведена реализация асинхронного управления двумя приводами. Как можно заметить из рисунка, процесс управления разделён на 3 блока: чтение состояния привода, включение привода в работу и задание целевой позиции. Все блоки следуют последовательно и визуально показывают состояние приводов. Некоторые переменные, подсвеченные фиолетовым цветом, заданы как глобальные, что даёт возможность передавать их параметры в/из других асинхронных программ.

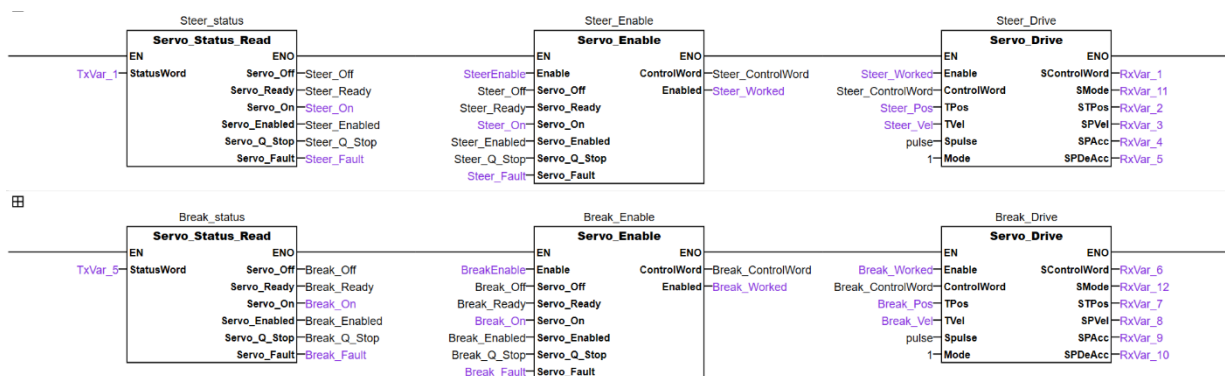


Рис. 9. Программа управления приводами

Как приводилось выше, помимо правильного управления периферийными блоками, важно иметь возможность анализировать работу каждого устройства и программы. Для этого будет разработана Scada-система. Посредством передачи данных по Modbus TCP на ЭВМ будут отображаться значения ключевых параметров.

VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы были рассмотрены основные аспекты внедрения системы автономного движения в серийный автомобиль. Была разработана структура системы управления транспортным средством, подробно описаны её основные элементы, а также способы воздействия на основные органы управления и системы управления этим воздействием. Особое внимание было уделено системе выхода из автономного режима по воздействию на органы управления со стороны водителя. В заключение была рассмотрена реализация некоторых блоков в среде программирования ПЛК.

В дальнейшем планируется проводить тестирование данной системы с целью определения оптимальных коэффициентов регуляторов и выделения направления дальнейшей модернизации системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Основные габаритные размеры Газель Некст, <https://gazel-rukovodstvo.ru/next/ex055.html> (дата обращения: 08.05.2026) - Текст: электронный.
- [2] Рулевое управление Газель Некст <https://gazel-rukovodstvo.ru/next/g076.html> дата обращения: 11.05.2026) - Текст: электронный.
- [3] Елисеев Е.И., Григорьев Л.В. Определение момента вращения рулевого колеса без вмешательства в работу системы рулевого управления. // Сб. трудов XIV научно-технической конференции молодых инженеров «ЭНЕРГИЯ МОЛОДОСТИ» АО «СИЛОВЫЕ МАШИНЫ». М.: Издательство «Перо», 2026. [Электронное издание]. С. 52-53. https://энергия-молодости.pf/files/2026/2026_Sbornik_Energia_molodosti.pdf

Разработка веб-приложения оператора в интеллектуальной системе видеонаблюдения с распознаванием лиц и походок

В. С. Ипатов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Ipatovvdim138@yandex.ru

Аннотация. В работе рассматривается web-приложение оператора как прикладной контур интеллектуальной системы видеонаблюдения с распознаванием лиц и походок. Описаны архитектура комплекса, конвейер «кадр – трек – событие – биометрия», разделение реляционного хранения событий (PostgreSQL) и векторного поиска (Milvus), а также модули интерфейса и REST API для мониторинга, архива, диспетчеризации событий и поиска появлений человека. Показано, что связка автоматической аналитики и операторского web-интерфейса снижает нагрузку на персонал и ускоряет разбор инцидентов при многокамерной эксплуатации.

Ключевые слова: видеонаблюдение; web-приложение; идентификация личности; биометрия; векторный поиск; PostgreSQL; Milvus

I. ВВЕДЕНИЕ

Системы видеонаблюдения широко применяются для охраны территорий, контроля доступа и мониторинга общественных пространств. В традиционном варианте оператор вручную просматривает записи: растёт число камер, данные не структурированы по объектам, затруднены идентификация человека и восстановление маршрута по нескольким источникам видео. Ограничения усиливаются человеческим фактором: невозможно одновременно эффективно контролировать десятки потоков и оперативно реагировать на инциденты.

Интеллектуальные системы автоматизируют детекцию людей, извлечение биометрических признаков (лицо и походка) и формирование событий – записей о завершённом треке на камере. Оператору требуется не сплошной просмотр архива, а инструменты поиска,

фильтрации и анализа. Цель работы – разработка web-приложения оператора, интегрированного в такой контур и обеспечивающего сценарии мониторинга, работы с событиями и биометрического поиска появлений. Для достижения цели решались задачи формирования требований к интерфейсу, проектирования обмена с сервисом детектора, согласования реляционной и векторной моделей данных и реализации клиент-серверного приложения на промышленном стенде.

II. АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ И МЕСТО WEB-ПРИЛОЖЕНИЯ

Комплекс включает уровень видеопотока (камеры RTSP/ONVIF), агрегатор MediaMTX, хранилище архивных записей, сервис детектора на GPU, базы данных и рабочие места операторов (рис. 1). Сервис детектора выполняет детекцию людей (YOLO), трекинг (DeepSort), по завершении трека – отбор ключевых кадров, извлечение векторов лица (InsightFace, размерность 512) и походки (GaitGraph, 128) с сохранением в Milvus и формированием события PersonLog в PostgreSQL.

Web-приложение состоит из клиента (Next.js, React, TypeScript) и серверной части (Django, Django REST Framework). Бэкенд – интеграционный узел: REST API, прокси к подсистеме распознавания, WebSocket для обновления журнала событий, обращения к PostgreSQL, Milvus и медиохранилищу. Асинхронный обмен результатами детектора с сервером организован через RabbitMQ, что сглаживает пики нагрузки и повышает отказоустойчивость при многокамерной эксплуатации [7]. Архитектура допускает горизонтальное масштабирование GPU-узлов, экземпляров API и объёма индексов Milvus без остановки остальных компонент.

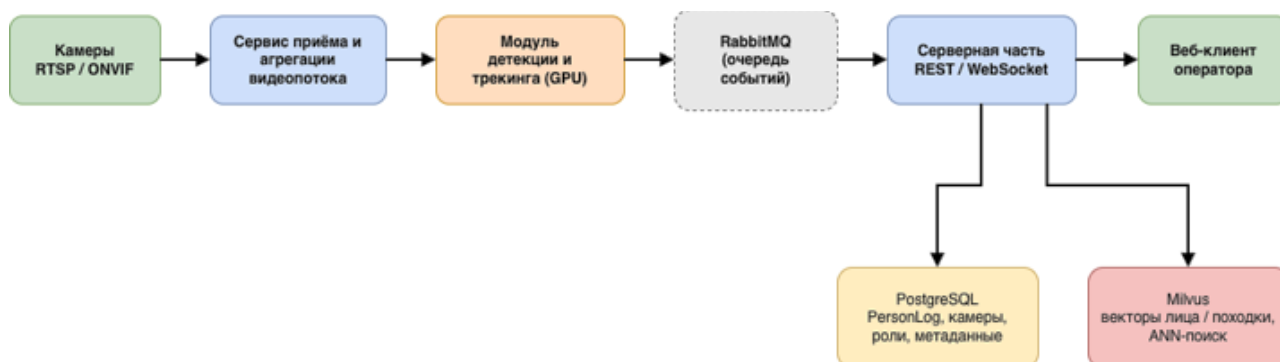


Рис. 1. Архитектура интеллектуальной системы видеонаблюдения и место web-приложения оператора

Основные функции web-приложения оператора:

- видеопоток и архив – просмотр в реальном времени и по записи;
- диспетчеризация – список событий, фильтры, карточка трека;
- поиск появлений – по биометрии или выбранному событию;
- администрирование – камеры, персоны, настройки, учётные записи.

III. ХРАНЕНИЕ ДАННЫХ И ПОИСК ПО БИОМЕТРИИ

Реляционная БД хранит метаданные: камеры, события (время входа и выхода, траектория, bounding box, ссылки на кадры и ролики, идентификаторы векторов в Milvus, роли пользователей). Векторная СУБД Milvus оптимизирована под поиск ближайших соседей в многомерном пространстве признаков; для лиц и походок используются отдельные коллекции (в т.ч. live и known). Связь контуров – через идентификаторы векторов в записи события: при запросе оператора сервер выполняет ANN-поиск в Milvus (индекс IVF_FLAT, метрика L2), затем обогащает результат карточками из PostgreSQL [5][6].

Типовой сценарий «клик по человеку в кадре»: по координатам и времени находится событие PersonLog, извлекаются векторы, выполняется поиск похожих появлений на камерах за период; результаты выдаются в хронологическом порядке для восстановления маршрута. Длительные запросы допускают фоновое выполнение с уведомлением оператора. Классические архитектуры с единой реляционной БД для всех данных плохо масштабируются при росте объёма биометрии: поиск сходства в многомерном пространстве требует специализированных индексов и алгоритмов ближайших соседей [5], что обосновывает выделение векторного хранилища.

IV. МОДЕЛЬ ДАННЫХ И ОБМЕН С ДЕТЕКТОРОМ

Центральная сущность реляционной модели — PersonLog: UUID события, camera_id, track_id, entry_time и exit_time, JSONB-поля track_coords и bboxes, списки face_vectors_ids и gait_vectors_ids, keyframe_links и video_links. Таблицы Camera, Person, User, RoleData обеспечивают конфигурацию потоков и разграничение доступа. Индексы по camera, track_id, created_at и полям векторных идентификаторов ускоряют типовые выборки диспетчера.

Сервис детектора после векторизации публикует результат в очередь; сервер приложения сохраняет метаданные и связывает их с записями Milvus. Такой порядок гарантирует, что оператор видит согласованную

карточку даже при кратковременной недоступности вычислительного узла: сообщения буферизуются до успешной записи.

V. РЕАЛИЗАЦИЯ WEB-ПРИЛОЖЕНИЯ ОПЕРАТОРА

Функциональность сгруппирована в модули: управление камерами, мониторинг и архив, панель диспетчера, поиск появлений, настройки, управление пользователями. Интерфейс построен на едином каркасе (навигация, индикация состояния Server, Recognition, Milvus, DB). API оформлен в стиле REST (/api/): ресурсы cameras, personlogs, persons, users, roles; специализированные маршруты – выдача кадров события, person_log_click, vectors_personlogid, health/status подсистемы распознавания.

Клиент использует TanStack Query и Zustand; видео воспроизводится через HLS (MediaMTX). Стенд разворачивается декларативно (docker-compose). Панель диспетчера реализует фильтрацию по камере, track_id, интервалу времени и наличию биометрии; карточка события показывает ключевые кадры и ролик. Мониторинг поддерживает сетку камер и полноэкранный режим; архив – выбор даты и перемотку с тем же механизмом поиска по клику. Практическая значимость: сокращение ручного просмотра архива, ускорение поиска появлений и масштабирование компонентов независимо (GPU-детектор, API, индексы Milvus) без переработки бизнес-логики интерфейса. Технологическая независимость контуров позволяет обновлять модели детекции и параметры индексов без изменения схемы PersonLog.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработано web-приложение оператора для интеллектуальной системы видеонаблюдения с распознаванием лиц и походок. Показано, что прикладной контур опирается на разделение реляционного и векторного хранения, микросервисную архитектуру и согласованный REST/WebSocket API. Дальнейшие работы – оценка точности идентификации в разных условиях съёмки, оптимизация латентности векторных индексов, расширение модальностей признаков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] InsightFace: 2D and 3D Face Analysis Project [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/deepinsight/insightface>.
- [2] Milvus Documentation [Электронный ресурс]. URL: <https://milvus.io/docs>.
- [3] PostgreSQL Documentation [Электронный ресурс]. URL: <https://www.postgresql.org/docs/>.
- [4] RabbitMQ Documentation [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rabbitmq.com/docs>.

Моделирование системы управления давлением во внутреннем контуре индивидуального теплового пункта

И. Касаткин

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

x1neus@yandex.ru

Аннотация. Рассматривается задача управления гидравлическим режимом во вторичном контуре индивидуального теплового пункта жилого здания. Особенностью объекта является изменение гидравлического сопротивления при работе термостатических клапанов, нелинейная зависимость напора циркуляционного насоса от скорости вращения и наличие физических ограничений исполнительного устройства. Для исследования системы разработана имитационная модель в MATLAB Simulink, включающая частотный преобразователь, насосный агрегат, гидравлическую сеть, датчик давления, погодозависимое формирование уставки и возмущающие воздействия. Выполнена настройка ПИ-регулятора и проведена оценка качества переходных процессов.

Ключевые слова: индивидуальный тепловой пункт; гидравлический режим; циркуляционный насос; частотное регулирование; погодозависимое регулирование; ПИ-регулятор; MATLAB Simulink

I. ВВЕДЕНИЕ

Повышение энергоэффективности инженерных систем жилых зданий является одной из актуальных задач автоматизации объектов жилищно-коммунального хозяйства. Значительная часть энергопотребления здания связана с обеспечением теплового режима, поэтому нерациональная работа насосного оборудования приводит не только к повышенным эксплуатационным затратам, но и к износу оборудования, перегреву помещений и ухудшению качества регулирования.

В традиционных системах регулирование гидравлического режима может выполняться дросселированием или байпасированием. Однако данные способы сопровождаются потерями энергии, так как насосный агрегат продолжает работать в нерациональном режиме. Более эффективным является частотное регулирование, при котором скорость вращения насоса изменяется в соответствии с текущей потребностью системы. Для центробежных насосов снижение скорости вращения приводит к существенному уменьшению потребляемой мощности, поскольку мощность пропорциональна кубу скорости вращения [1].

Целью работы является разработка и исследование системы автоматического управления давлением во вторичном контуре индивидуального теплового пункта с применением частотного регулирования циркуляционного насоса и погодозависимого формирования уставки.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И СТРУКТУРА СИСТЕМЫ

В качестве объекта управления рассматривается система отопления жилого здания, подключенная к тепловой сети через индивидуальный тепловой пункт по независимой схеме. В такой структуре первичный контур тепловой сети и вторичный контур системы отопления разделены теплообменником. Согласно требованиям к тепловым пунктам, в их составе должны предусматриваться оборудование, арматура, приборы контроля, управления и автоматизации, обеспечивающие поддержание заданных параметров температуры и давления [2].

Основной регулируемой величиной является давление во вторичном контуре системы отопления. Управляющим воздействием является частота вращения электродвигателя циркуляционного насоса, задаваемая через частотный преобразователь. Возмущающими воздействиями являются изменение положения термостатических клапанов в помещениях и изменение положения регулирующего клапана первичного контура.

Расчётный объект представляет собой 9-этажное жилое здание с отапливаемой площадью 8500 м². Основные расчётные параметры приведены в табл. I.

ТАБЛИЦА I. РАСЧЕТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ

Параметр	Значение
Этажность здания	9 этажей
Отапливаемая площадь	8500 м ²
Тепловая нагрузка	791 кВт
Расход теплоносителя	34 м ³ /ч
Статическое давление в нижней точке	0,40–0,45 МПа
Расчетный напор циркуляционного насоса	28 м

На основании расчётных параметров выбран комплект технических средств, включающий программируемый логический контроллер, частотный преобразователь, циркуляционный насос, датчик давления и регулирующий клапан. В качестве насосного агрегата принят центробежный насос КМ 80-65-160а с номинальной подачей 45 м³/ч и напором 28 м [3]. Для управления электродвигателем насоса используется частотный преобразователь ОВЕН ПЧВЗ мощностью 7,5 кВт [4].

Структура системы управления включает блок погодозависимого формирования уставки, сумматор ошибки, ПИ-регулятор, блок ограничения управляющего сигнала, частотный преобразователь, насосный агрегат, гидравлическую сеть и датчик давления.

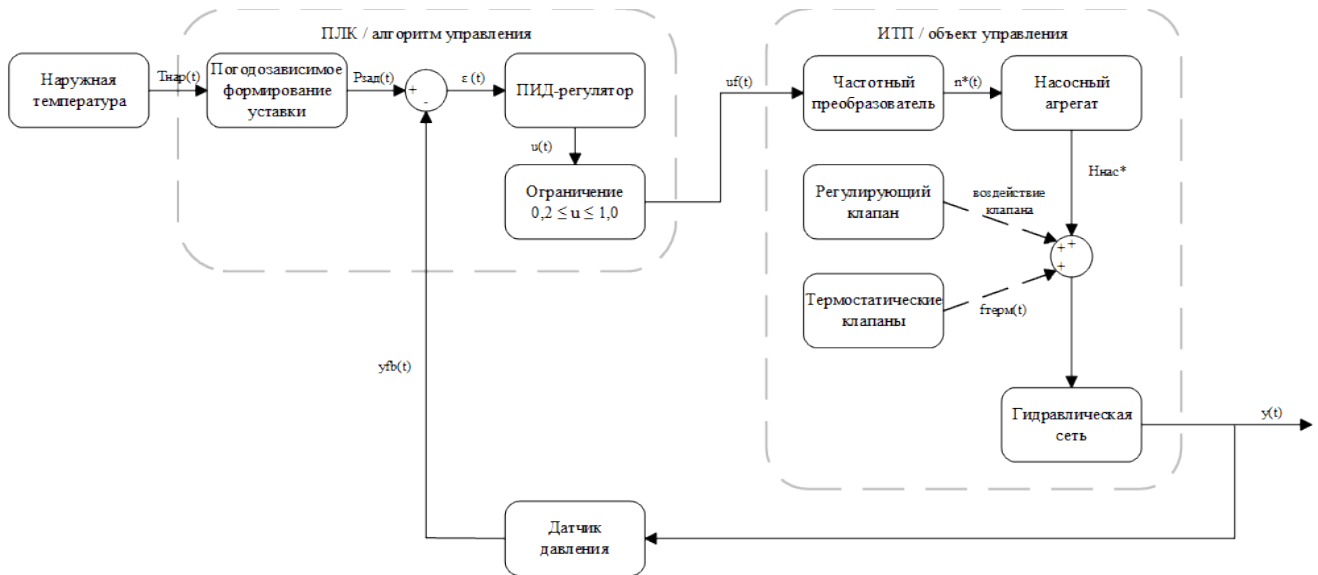


Рис. 1. Структурная схема системы управления давлением во вторичном контуре индивидуального теплового пункта

Сигнал фактического давления поступает с датчика в цепь обратной связи и сравнивается с задающим воздействием. Ошибка регулирования определяется выражением (1)

$$\varepsilon(t) = P_{\text{зад}}(t) - y_{fb}(t), \quad (1)$$

где $P_{\text{зад}}$ – заданное давление, y_{fb} – сигнал обратной связи с датчика давления.

После регулятора установлен блок ограничения управляющего сигнала. Он отражает физические пределы работы частотного преобразователя и электродвигателя насоса. В модели используется диапазон (2)

$$0,2 \leq u_f \leq 1, \quad (2)$$

где u_f – нормированное значение управляющего сигнала, соответствующее относительной частоте вращения насоса.

III. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ

Математическая модель разработана в относительных величинах. Такой подход позволяет упростить структуру модели и сосредоточиться на анализе динамики системы управления без потери основных физических зависимостей.

Частотный преобразователь представлен аperiodическим звеном первого порядка. С учётом времени разгона, указанного в документации на преобразователь, передаточная функция принята в виде (3)

$$W_{\text{пч}}(p) = \frac{1}{p + 1} \quad (3)$$

Насосный агрегат описывается на основе законов подобия центробежных насосов. В относительных величинах подача насоса пропорциональна скорости вращения, а создаваемый напор пропорционален квадрату скорости (4)

$$\begin{aligned} Q_{\text{нас}}^* &= n^*, \\ H_{\text{нас}}^* &= (n^*)^2, \end{aligned} \quad (4)$$

где n^* – относительная скорость вращения насоса.

Гидравлическая сеть вторичного контура включает трубопроводы, стояки, отопительные приборы, балансировочные и термостатические клапаны, запорную арматуру и местные сопротивления. В модели она представлена эквивалентным звеном, учитывающим суммарные сопротивляющиеся и инерционные свойства системы. Потери давления в сети имеют нелинейный характер и в первом приближении описываются квадратичной зависимостью (5)

$$\Delta H_{\text{сети}}^* = k_R * (Q^*)^2 \quad (5)$$

Инерционность гидравлической сети учитывается передаточной функцией (6)

$$W_{\text{гид}}(p) = \frac{1}{5p + 1} \quad (6)$$

Датчик давления представлен аperiodическим звеном первого порядка (7)

$$W_{\text{дат}}(p) = \frac{1}{0,1p + 1} \quad (7)$$

Погодозависимое формирование уставки реализовано на основании температуры наружного воздуха. При повышении наружной температуры тепловая нагрузка здания уменьшается, поэтому уставка давления во вторичном контуре также может быть снижена. Для исключения выхода системы в предельный режим уставка давления ограничена диапазоном (8)

$$0,42 \leq P_{\text{зад}} \leq 0,63 \quad (8)$$

Первоначально для системы рассматривался ПИД-закон регулирования. Однако при моделировании было установлено, что дифференциальная составляющая вызывает резкие кратковременные изменения управляющего сигнала при скачкообразном изменении уставки. Так как система отопления является инерционным объектом, а для насосного агрегата желательно обеспечить плавное изменение частоты вращения, в итоговой модели используется ПИ-регулятор (9)

$$u(t) = K_p \varepsilon(t) + K_i \int \varepsilon(t) dt \quad (9)$$

Настройка коэффициентов выполнялась методом последовательного подбора в MATLAB Simulink. В результате были приняты значения $K_p = 2,0$, $K_i = 0,4$, $K_d = 0$. При настройке контролировались устойчивость переходного процесса, величина перерегулирования, время регулирования, статическая ошибка, отсутствие длительной работы в зоне насыщения и плавность управляющего сигнала.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для проверки работоспособности системы управления выполнено моделирование в MATLAB Simulink. Продолжительность моделирования составила 600 с. В ходе моделирования анализировались заданное давление, фактическое давление во вторичном контуре, ошибка регулирования, управляющий сигнал и относительная скорость вращения насоса.

Рассматривались следующие режимы: пуск системы, погодозависимое изменение уставки давления, возмущение от термостатических клапанов и изменение положения регулирующего клапана первичного контура. Возмущение от термостатических клапанов вводилось в момент времени 200 с и имитировало изменение расхода теплоносителя вследствие изменения проходного сечения радиаторных ветвей. Изменение положения регулирующего клапана первичного контура рассматривалось как дополнительное воздействие, влияющее на тепловую нагрузку теплообменного узла.

Для количественной оценки качества регулирования использовались время регулирования, перерегулирование и статическая ошибка. Время регулирования определялось как промежуток времени от момента изменения задающего или возмущающего воздействия до момента входа регулируемой величины в допустимую область отклонения. В работе допустимая область принималась равной $\pm 5\%$ от установившегося значения.

Результаты моделирования приведены в табл. II.

ТАБЛИЦА II. ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Режим	Время регулирования, с	Перерегулирование, %	Статическая ошибка
Пуск системы	13,28	6,96	≈ 0
Изменение погодозависимой уставки	2,56	12,59	≈ 0
Возмущение от термостатических клапанов	менее 1	0,25	≈ 0
Изменение положения регулирующего клапана	менее 1	0,12	≈ 0

По результатам моделирования установлено, что система управления обеспечивает устойчивое поддержание давления во вторичном контуре. После окончания переходных процессов ошибка регулирования стремится к нулю, а управляющий сигнал находится в допустимом диапазоне. Кратковременное приближение управляющего сигнала к верхней границе не приводит к потере устойчивости системы.

При пуске системы время регулирования составило 13,28 с, а перерегулирование – 6,96 %. При изменении погодозависимой уставки наблюдалось большее перерегулирование, равное 12,59 %, однако переходный процесс завершался за 2,56 с. При возмущениях от термостатических клапанов и регулирующего клапана время восстановления составило менее 1 с, что показывает способность регулятора компенсировать умеренные изменения гидравлического режима.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена проблема автоматического управления давлением во вторичном контуре индивидуального теплового пункта при переменной нагрузке, нелинейности гидравлической системы и ограничениях исполнительного устройства. Разработана имитационная модель системы управления циркуляционным насосом, учитывающая инерционность частотного преобразователя, насосного агрегата, гидравлической сети и датчика давления, а также возмущающие воздействия от термостатических клапанов и регулирующего клапана первичного контура.

В результате настройки регулятора выбран ПИ-закон управления с коэффициентами $K_p = 2,0$ и $K_i = 0,4$. Отказ от дифференциальной составляющей позволил уменьшить резкие изменения управляющего сигнала и обеспечить более плавное управление насосным агрегатом. Моделирование показало, что система обеспечивает устойчивое поддержание давления, компенсацию возмущений и отсутствие статической ошибки в исследуемых режимах.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке и модернизации автоматизированных систем управления индивидуальными тепловыми пунктами жилых зданий. Дальнейшее развитие работы может быть связано с реализацией алгоритма в CODESYS V3.5, интеграцией с SCADA-системой по протоколу Modbus и проверкой модели на физическом стенде или цифровом двойнике теплового пункта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] ОВЕН САУ-МП управляет насосами в системах водоснабжения жилых домов // ОВЕН. – [Электронный ресурс]. – URL: https://owen.ru/project/oven_sau-mp_upravlyaet_nasosami_v_sistemah_vodosnabzheniya_zhilykh_domo_v
- [2] СП 510.1325800.2022. Тепловые пункты и системы внутреннего теплоснабжения. – [Электронный ресурс]. – URL: https://meganorm.ru/mega_doc/norm/metodika/0/sp_510_1325800_20_22_svod_pravil_teplovyie_punkt_y_i_sistemy.html
- [3] Насосы KM 80-65-160a. Характеристики: $Q = 45 \text{ м}^3/\text{ч}$, $H = 28 \text{ м}$ // ГМС Ливгидромаш. – [Электронный ресурс]. – URL: https://www.hms-livgidromash.ru/catalog/nasosy/km/km_80_65_160a_model_1051.html
- [4] Преобразователь частоты ПЧВ3-7К5-В [M01] 7,5 кВт 380 В // ОВЕН. – [Электронный ресурс]. – URL: https://owen.ru/product/pchv3_7k5_b90
- [5] Преобразователи давления ОВЕН ПД100И // ОВЕН-Энерго. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://owen-russia.ru/product-category/datchiki/preobrazovateli-davleniya/>
- [6] Зайцев А.П. Основы теории автоматического управления: учебное пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2000. 152 с. – [Электронный ресурс]. URL: <https://portal.tpu.ru/SHARED/L/YAPUNOV/Academic/Tab/tau1.pdf>

Особенности реализации диапазонных доказательств Bulletproofs в задачах KYC с фиксированной шириной интервала

Н. Е. Кашко

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

kashkonikev@gmail.com

Аннотация. В работе рассматривается применение криптографических протоколов с нулевым разглашением (ZKP), в частности диапазонных доказательств Bulletproofs, в процедурах «Знай своего клиента» (KYC). Показано, что архитектурное ограничение Bulletproofs преодолевается сдвигом и масштабированием доказываемого значения. Предложен метод приведения произвольного интервала $[\min, \max]$ к степени двойки с сохранением возможности однозначного восстановления исходных границ. Доказана корректность обратного преобразования, что позволяет использовать стандартную реализацию Bulletproofs без модификации криптографического ядра.

Ключевые слова: Bulletproofs, диапазонные доказательства, KYC, zero-knowledge proof, масштабирование, сдвиг, восстановление диапазона

I. ВВЕДЕНИЕ

Современные системы «Знай своего клиента» (KYC) требуют от финансовых организаций регулярного обновления риск-профиля клиентов на основе достоверных, но при этом конфиденциальных данных, например, о доходах. Традиционный подход предполагает передачу клиентом копий документов (справок 2-НДФЛ, банковских выписок), что создаёт риски утечек и противоречит принципу минимизации персональных данных (152-ФЗ). Альтернативой является использование криптографических доказательств с нулевым разглашением (ZKP), которые позволяют клиенту подтвердить, что его доход лежит в заданном диапазоне, не раскрывая точного значения.

II. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Одним из наиболее эффективных и практически реализованных протоколов для этой задачи являются Bulletproofs [2]. Этот протокол обеспечивает логарифмический размер доказательства, не требует доверенной настройки (trusted setup) и позволяет верифицировать диапазонные утверждения за миллисекунды. Однако Bulletproofs накладывают жёсткое ограничение на форму доказываемого интервала: доказательство возможно только для диапазона вида:

$$[0, 2^n - 1]$$

$[0, 2^n - 1]$, где n – степень двойки. В реальных KYC-сценариях требуется доказывать принадлежность произвольному интервалу $[\min, \max]$ (например, от 50 000 до 200 000 рублей). В настоящей работе анализируется указанное ограничение и предлагается метод его преодоления путём сдвига и масштабирования значения,

а также показывается, как обеспечить однозначное восстановление исходных границ диапазона.

Проблема:

Пусть клиент имеет доход a (в рублях) и хочет доказать банку, что $a \in [\min, \max]$, где $\min$ и $\max$ – известные обеим сторонам границы. В протоколе Bulletproofs доказываемое, что некоторое скрытое значение v удовлетворяет [1]:

$$0 \leq v < 2^n$$

Таким образом, непосредственное применение Bulletproofs к исходному значению a невозможно, если $\min \neq 0$.

III. ПРЕДЛАГАЕМОЕ РЕШЕНИЕ

Стандартный подход – сдвиг. Вычитанием $\min$ из всех частей неравенства получаем эквивалентное утверждение:

$$2 \leq (a - \min) \leq (\max - \min) \quad (1)$$

Обозначим $\text{shifted} = a - \min$. Требуется доказать, что shifted принадлежит интервалу $[0, W]$, где $W = \max - \min$. Однако в реальных системах W может быть любым целым числом. В то же время алгоритмы генерации диапазонных доказательств Bulletproofs позволяют строить доказательство только для интервалов вида $[0, 2^n - 1]$, где n – целое (битность). Проблему нулевой левой границы (классический случай $\min < a < \max$) решает сдвиг. Вместе с тем сохраняется ограничение на возможные значения верхней границы: W должно принимать значения на единицу меньше степени двойки (например, 4, 16, 256, 65535).

Обойти это ограничение можно, умножив все части неравенства (1) на положительный коэффициент x :

$$2 < (a - \min) \cdot x < (\max - \min) \cdot x$$

Подберём x таким образом, чтобы:

$$(\max - \min) \cdot x = 2^n - 1$$

Тогда масштабированное значение $(a - \min) \cdot x$ доказываемое для эталонного интервала:

$$[0, 2^n - 1]$$

Такая незначительная доработка механизма подготовки данных позволяет применять Bulletproofs к произвольному диапазону значений, не изменяя

криптографическое ядро и не нарушая свойств полноты и нулевого разглашения.

IV. РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ОДНОЗНАЧНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ

A. Нахождение коэффициента масштабирования.

После того как доказательство построено для интервала $[0, W]$, где $W = (\max - \min) \cdot x$, необходимо восстановить исходные границы $\min$ и $\max$. Предположим, что фиксированная ширина эталонного интервала (стандарт) равна $S = 65535$. Тогда коэффициент масштабирования $x = W / S$. Поскольку деление в поле вещественных чисел является взаимно однозначной операцией, x определяется единственным образом.

B. Восстановление исходных границ.

Для точного восстановления диапазона требуется знать исходную нижнюю границу $\min$. Она передаётся банку в открытом виде (например, как параметр запроса). Имея $\min$ и x , истинные границы восстанавливаются следующим образом:

Из доказанного неравенства:

$$0 \leq a' < W,$$

где $a' = (a - \min) \cdot x$, после деления на x и прибавления $\min$ получаем:

$$\min \leq a < \min + W/x = \min + (\max - \min) = \max$$

Таким образом, банк получает все необходимые сведения для принятия решения о риск-профиле.

C. Восстановление исходных границ.

В предложенной схеме клиент не может изменить нижнюю границу в сторону увеличения (правее), так как доказательство покроет меньший интервал и, скорее всего, не будет соответствовать запрошенному банком диапазону. Если же клиент попытается уменьшить переданную банку границу (сдвинуть влево), то:

- Верхняя граница автоматически уменьшится (так как ширина фиксирована).
- Если реальный доход a не попадал в исходный диапазон, то сдвиг влево сделает условие:

$$a \in [\min', \min' + S],$$

ещё более жёстким, и клиент не сможет построить корректное доказательство.

- Если же доход изначально лежал в запрошенном диапазоне, то сдвиг $\min$ влево лишь сместит интервал вниз, и клиент докажет, что его доход ниже ожидаемого банком уровня. Это для банка является лишь более выгодной ситуацией.

- Сдвиг границы вправо (увеличение $\min$) бессмыслен, поскольку банк легко обнаружит несоответствие – он ожидает диапазон, вычисленный по переданному $\min$ и фиксированной ширине, а клиент не может произвольно увеличить $\min$, не нарушив условия доказательства.

Таким образом, клиент не может манипулировать границами в свою пользу, а сама схема гарантирует корректность восстановления исходного диапазона без дополнительных рисков.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленном докладе рассмотрена проблема использования диапазонных доказательств Bulletproofs в задачах подтверждения дохода клиента в рамках процедур KYC. Показано, что прямое применение протокола ограничено интервалами вида [1]:

$$[0, 2^n - 1],$$

что не соответствует реальным требованиям банков (произвольные границы $\min$ и $\max$).

Предложен метод, сочетающий сдвиг и масштабирование доказываемой величины. Вычитанием $\min$ из значения и границ неравенство приводится к виду:

$$0 \leq (a - \min) \leq (\max - \min),$$

после чего масштабированием достигается приведение верхней границы к степени двойки. Показано, что такое преобразование не нарушает свойств полноты и нулевого разглашения Bulletproofs.

Отдельное внимание уделено восстановлению исходного диапазона после верификации. Введён коэффициент масштабирования x , вычисляемый как отношение эталонной ширины к фактической. Передача нижней границы $\min$ в открытом виде позволяет банку однозначно восстановить $\max$ и убедиться в корректности доказательства.

Доказано, что клиент не может злоупотребить передачей границ: сдвиг $\min$ влево либо делает условие невыполнимым, либо приводит к занижению дохода, что невыгодно самому клиенту; сдвиг вправо легко обнаруживается банком. Таким образом, схема сохраняет устойчивость к манипуляциям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Morais E., Koens T., van Wijk C., Koren A. A Survey on Zero Knowledge Range Proofs and Applications // arXiv:1907.06381 [cs.CR]. 2019. 34 c.
- [2] Bünz B., Bootle J., Boneh D., Poelstra A., Wuille P., Maxwell G. Bulletproofs: Short Proofs for Confidential Transactions and More // 2018 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP). IEEE, 2018. P. 315–334. DOI: 10.1109/SP.2018.00020.

Исследование влияния растворенного кислорода и времени удержания ила на эффективность нитрификации в мембранном биореакторе

Л. А. Лоцилов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

E-mail: 5116230@mail.ru

Аннотация. На основе сокращённой модели ASM1 исследовано совместное влияние уставки растворённого кислорода $DO_{зад}$ и времени удержания ила SRT на нитрификацию в мембранном биореакторе. Сформирована матрица из 25 режимов при $DO_{зад} = 0,3-4,0$ мг $O_2/л$ и SRT = 5–30 сут. Синтезирован ПИ-регулятор кислорода с параметрами $K_p = 13,063$ и $K_i = 5,00$ ч⁻¹; запас по фазе составляет 94,2°. Критерий $S_{NH,уст} \leq 1,0$ мг N/л выполнен в 16 сценариях. Переход от $DO_{зад} = 2$ до 4 мг $O_2/л$ при SRT = 20 сут снижает остаточный аммоний только на 0,05 мг N/л, но увеличивает аэрационную нагрузку на 53 %. Рекомендуемая область: $DO_{зад} = 1-2$ мг $O_2/л$ при SRT = 10–20 сут.

Ключевые слова: мембранный биореактор; нитрификация; растворённый кислород; время удержания ила; ASM1; ПИ-регулятор; аэрационная нагрузка

I. ВВЕДЕНИЕ

Удаление аммонийного азота относится к основным задачам биологической очистки сточных вод. Мембранный биореактор (МБР) объединяет аэробный реактор и мембранное разделение: растворённые компоненты проходят через мембрану, а взвешенная биомасса удерживается в системе. Благодаря этому гидравлическое время удержания и время удержания ила SRT задаются независимо, что создаёт условия для накопления медленно растущих нитрифицирующих бактерий [1], [2].

На устойчивость нитрификации прежде всего влияют концентрация растворённого кислорода DO и SRT. При недостатке кислорода фактическая скорость роста автотрофов снижается, а при коротком SRT их рост не компенсирует отмирание и вывод с избыточным илом. Повышение $DO_{зад}$ обычно улучшает окисление аммония, но одновременно увеличивает расход воздуха [3]–[5].

Инженерная задача состоит не в максимизации аэрации, а в поиске сочетания $DO_{зад}$ –SRT, обеспечивающего заданное качество очистки при минимально необходимой аэрационной нагрузке. В качестве ограничения качества принято условие $S_{NH,уст} \leq 1,0$ мг N/л. Энергетическая сторона режима оценивается средним коэффициентом массопередачи kLa_{cp} и интегральным показателем $J_{aэp} = \int kLa \cdot dt$.

Цель исследования – определить рациональную область режимов МБР и проверить работоспособность локального контура регулирования DO. Управляемой координатой является концентрация S_O , управляющим воздействием – kLa , а SRT рассматривается как

медленный режимный параметр, задаваемый через расход вывода избыточного ила.

II. МОДЕЛЬ МЕМБРАННОГО БИОРЕАКТОРА И КОНТУР РЕГУЛИРОВАНИЯ DO

Модель реализована в MATLAB/Simulink R2024a на основе сокращённой схемы ASM1 [3]. Реактор рассматривается как аппарат идеального смешения постоянного объёма. Температура принята равной 20 °С, мембрана полностью задерживает биомассу, а нитрит, гетеротрофная биомасса и денитрификация явно не моделируются. Основными координатами являются растворённый кислород S_O , аммонийный азот S_{NH} , нитратный азот S_{NO} и автотрофная биомасса X_{BA} .

Кинетический член роста нитрифицирующей биомассы описан двойной зависимостью Моно: $F_1 = m \cdot X_{BA} \cdot S_O / (K_O + S_O) \cdot S_{NH} / (K_{NH} + S_{NH})$. Материальные балансы записаны в форме «накопление = гидравлический перенос ± биохимическое превращение». Для растворённых веществ используется член $(S_{вх} - S)/T$, перенос кислорода задаётся выражением $kLa \cdot (S_{O,нас} - S_O)$, а вывод автотрофной биомассы – членом $-X_{BA}/SRT$. Последний непосредственно отражает физический смысл SRT: при его уменьшении возрастает скорость удаления нитрификаторов из реактора [6], [7].

Для основных координат система включает балансы аммония, кислорода и автотрофной биомассы:

$$\begin{aligned} dS_{NH}/dt &= (S_{NH,ex} - S_{NH})/T - k_3 F_1 + k_h X_{ND}; \\ dS_O/dt &= (S_{O,ex} - S_O)/T + kLa(S_{O,нас} - S_O) - k_1 F_1; \\ dX_{BA}/dt &= F_1 - b_A X_{BA} - X_{BA}/SRT. \end{aligned}$$

Из баланса X_{BA} следует условие сохранения нитрифицирующей биомассы: эффективная скорость роста должна компенсировать отмирание b_A и вывод $1/SRT$. При нарушении этого условия единственным устойчивым состоянием становится вымывание X_{BA} . Для рабочей точки $DO_{зад} = 2$ мг $O_2/л$ и SRT = 20 сут получены $S_{NH*} \approx 0,43$ мг N/л, $X_{BA*} \approx 112,4$ мг ХПК/л и $kLa* \approx 2,83$ ч⁻¹; эти значения использованы при линеаризации.

Локальный ПИ-регулятор сравнивает текущую концентрацию S_O с уставкой $DO_{зад}$ и формирует управляющий сигнал kLa по закону $kLa(t) = \text{огр}[0; 5](K_p \cdot e(t) + K_i \int e(t) dt)$, где $e(t) = DO_{зад} - S_O(t)$. Ограничение $0 \leq kLa \leq 5$ ч⁻¹ соответствует принятому диапазону аэрации; для предотвращения накопления интегральной ошибки применена защита anti-windup. Линеаризация в

рабочей точке $DO_{зад} = 2,0$ мг O_2 /л и $SRT = 20$ сут дала объект первого порядка $G_{DO}(s) = 0,97/(0,162s + 1)$.

Параметры регулятора найдены численной минимизацией интегральной абсолютной ошибки IAE на полной нелинейной модели: $K_p = 13,063$, $K_i = 4,9997$ ч⁻¹ (в модели принято 5,00 ч⁻¹), $T_i = 2,613$ ч. Частотный анализ показал запас по фазе 94,2° и бесконечный запас по амплитуде. Следовательно, контур устойчив и не требует перенастройки в рекомендуемой области режимов.

III. ПОСТАНОВКА ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Численный эксперимент выполнен на полной матрице 5×5. Уставка кислорода принимала значения $DO_{зад} = 0,3; 0,5; 1,0; 2,0; 4,0$ мг O_2 /л, а время удержания или – $SRT = 5; 10; 15; 20; 30$ сут. Диапазон включает кислорододефицитные, рабочие и избыточно аэрируемые режимы, а также переход от короткого SRT к условиям устойчивого удержания автотрофной биомассы.

Во всех сценариях использованы одинаковые условия: гидравлическое время $T = 20$ ч, входная концентрация $S_{NH,вх} = 80$ мг N /л, $S_{NO,вх} = 10$ мг N /л и концентрация насыщения кислородом $S_{O,нас} = 8$ мг O_2 /л. Продолжительность расчёта составляла 3000 ч; установившиеся значения определялись усреднением последних 300 ч. Такой горизонт необходим, поскольку кислородный контур имеет минутный масштаб, а накопление биомассы продолжается сотни часов.

Для каждого режима вычислялись $S_{NH,уст}$, $S_{NO,уст}$, $X_{BA,уст}$, kLa_{cp} , $J_{aэp}$, нормированная ошибка DO и доля времени работы регулятора на верхнем ограничении. Режим считался приемлемым при выполнении $S_{NH,уст} \leq 1,0$ мг N /л и отсутствии вымывания автотрофной биомассы.

Распределение допустимых режимов по матрице имеет закономерный вид. При $DO_{зад} = 0,3$ мг O_2 /л критерий не выполняется ни в одном из пяти случаев; при 0,5 мг O_2 /л – в трёх режимах, начиная с $SRT = 15$ сут; при 1 и 2 мг O_2 /л – в четырёх режимах, начиная с $SRT = 10$ сут; при 4 мг O_2 /л – во всех пяти режимах. В сумме допустимыми являются 16 из 25 сочетаний.

ТАБЛИЦА I. ВЫПОЛНЕНИЕ КРИТЕРИЯ $S_{NH,уст} \leq 1,0$ мг N /л

SRT / DO	0,3	0,5	1,0	2,0	4,0
5	–	–	–	–	+
10	–	–	+	+	+
15	–	+	+	+	+
20	–	+	+	+	+
30	–	+	+	+	+

ТАБЛИЦА II. ПОКАЗАТЕЛИ ПРИ $SRT = 20$ СУТ

$DO_{зад}$, мг O_2 /л	$S_{NH,уст}$, мг N /л	kLa_{cp} , ч ⁻¹
0,3	1,400	1,481
0,5	0,818	1,857
1,0	0,538	2,163
2,0	0,429	2,608
4,0	0,379	3,987

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Критерий по остаточному аммонии выполнен в 16 из 25 сценариев. При $DO_{зад} = 0,3$ мг O_2 /л ни одно значение SRT не обеспечивает $S_{NH,уст} \leq 1,0$ мг N /л. Наиболее

неблагоприятно сочетание $DO_{зад} = 0,3$ мг O_2 /л и $SRT = 5$ сут: ПИ-регулятор формально удерживает низкую уставку кислорода, однако X_{BA} вымывается и нитрификация срывается. Это показывает, что малая ошибка DO сама по себе не подтверждает биологическую работоспособность процесса.

При фиксированном $SRT = 20$ сут рост $DO_{зад}$ монотонно снижает остаточный аммоний, но отдача быстро уменьшается (табл. 2). Переход от 0,3 до 0,5 мг O_2 /л переводит режим в допустимую область: $S_{NH,уст}$ уменьшается с 1,400 до 0,818 мг N /л. При повышении $DO_{зад}$ от 2 до 4 мг O_2 /л аммоний снижается лишь с 0,429 до 0,379 мг N /л, то есть на 0,05 мг N /л.

Одновременно kLa_{cp} возрастает с 2,608 до 3,987 ч⁻¹, а $J_{aэp}$ – на 52,9 %. Уставка 4 мг O_2 /л поэтому является сравнительной верхней границей, но не рациональным постоянным режимом. Наиболее выгодный компромисс по качеству нитрификации и аэрационной нагрузке формируется в диапазоне $DO_{зад} = 1–2$ мг O_2 /л.

Наибольший эффект SRT проявляется при переходе от 5 к 10–15 сут. При $DO_{зад} = 2$ мг O_2 /л рост SRT с 5 до 30 сут увеличивает $X_{BA,уст}$ с 64,3 до 123,1 мг ХПК/л и снижает $S_{NH,уст}$ с 1,105 до 0,379 мг N /л (табл. 3). Средний kLa при этом меняется лишь от 2,478 до 2,615 ч⁻¹. Следовательно, SRT воздействует преимущественно на запас медленно растущей биомассы, а не на мгновенную потребность в кислороде.

ТАБЛИЦА III. ПОКАЗАТЕЛИ ПРИ $DO_{зад} = 2$ мг O_2 /л

SRT, сут	$S_{NH,уст}$, мг N /л	$X_{BA,уст}$, мг ХПК/л
5	1,105	64,3
10	0,600	90,4
15	0,481	104,3
20	0,429	112,9
30	0,379	123,1

Переходные процессы подтверждают разделение временных масштабов. S_O выходит на уставку быстро, без устойчивых колебаний, тогда как X_{BA} достигает установившегося уровня значительно медленнее. Поэтому эксплуатационная оценка МБР должна одновременно учитывать DO , остаточный аммоний и запас биомассы: формально устойчивый кислородный контур может работать в биологически неэффективном режиме.

Увеличение SRT частично компенсирует кислородное ограничение, но не заменяет достаточную уставку. При $DO_{зад} = 0,5$ мг O_2 /л критерий выполняется только начиная с $SRT = 15$ сут. При $DO_{зад} = 4,0$ мг O_2 /л условие выполняется во всех пяти режимах, однако цена такого запаса – существенно более высокая аэрационная нагрузка.

В рекомендуемой области параметры ПИ-регулятора оставались неизменными. Контур поддерживал S_O около заданной уставки без устойчивых колебаний и длительного насыщения. Это подтверждает возможность разделить задачи управления: быстрый внутренний контур отвечает за кислород, а медленный верхний уровень выбирает $DO_{зад}$ с учётом SRT и качества очищенной воды.

V. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ РАБОЧЕГО РЕЖИМА

По совокупности качества нитрификации и аэрационной нагрузки рекомендуемая область

составляет $DO_{зад} = 1\text{--}2$ мг O_2 /л при $SRT = 10\text{--}20$ сут. Уставка 1 мг O_2 /л предпочтительна при стабильной входной нагрузке и приоритете энергосбережения. Значение 2 мг O_2 /л обеспечивает большой запас по кислороду и может использоваться как базовая настройка при неопределённости состава сточных вод.

Режим $DO_{зад} = 0,5$ мг O_2 /л допустим при $SRT \geq 15$ сут как энергосберегающий, но требует усиленного контроля аммония, нитрита и состояния датчика DO. Уставка 0,3 мг O_2 /л не рекомендуется: в принятой модели ни один исследованный SRT не обеспечивает заданный критерий.

Уставка $DO_{зад} = 4$ мг O_2 /л целесообразна только для пусковых операций или кратковременной компенсации неблагоприятных возмущений. При $SRT = 20$ сут переход от $DO_{зад} = 4$ мг O_2 /л к диапазону 1–2 мг O_2 /л уменьшает $J_{aэр}$ примерно на 35–46 % при сохранении низкого остаточного аммония.

Полученные результаты могут использоваться при построении верхнего уровня управления МБР. Перспективна каскадная система $DO + NH_4$, в которой внешний контур по аммонии корректирует $DO_{зад}$, а внутренний ПИ-контур стабилизирует кислород. Такое решение позволяет снижать аэрацию при малой нагрузке и повышать уставку только при риске выхода аммония за допустимый предел [8], [9].

Для практической настройки целесообразно использовать ступенчатую стратегию. На этапе пуска выбирается консервативная уставка $DO_{зад} = 2$ мг O_2 /л при SRT около 15–20 сут. После стабилизации биомассы и накопления статистики уставка может быть снижена до 1 мг O_2 /л. Возврат к повышенной уставке требуется при росте аммония, падении температуры либо увеличении доли времени, когда kLa находится на верхнем ограничении. Такой порядок учитывает различие быстрых кислородных и медленных биологических процессов.

VI. ОГРАНИЧЕНИЯ МОДЕЛИ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ

Результаты имеют расчётно-аналитический характер. Модель агрегирует АОВ и NOB в одну автотрофную популяцию, не описывает явную динамику нитрита, гетеротрофную биомассу, денитрификацию, изменение pH и мембранное загрязнение. Поэтому выводы относятся к нитрификационной подсистеме, а не к полному циклу удаления общего азота.

Кинетические параметры приведены к постоянной температуре 20 °С. В реальной эксплуатации температура сточных вод изменяется сезонно; при её снижении рост нитрификаторов замедляется и может потребоваться более длинный SRT или повышенная уставка DO. Перед промышленным применением необходима температурная калибровка коэффициентов модели.

Входная концентрация $S_{NH,ex} = 80$ мг N/л также принята постоянной. Для проверки работоспособности выбранных настроек необходимо исследовать суточные, недельные и ступенчатые возмущения по концентрации и расходу входного потока, а также влияние погрешности датчика DO и ограничений исполнительного механизма.

Дальнейшее развитие работы связано с расширением модели до полной схемы ASM1, идентификацией параметров по данным конкретного сооружения и натурной проверкой. Дополнительно целесообразно включить в критерий оптимизации фактический расход воздуха или электроэнергию компрессора, поскольку интеграл kLa является расчётным индикатором, а не прямой энергетической величиной.

Практическая ценность матрицы $DO_{зад}$ – SRT состоит в количественном выборе режима. Для каждой пары параметров одновременно оцениваются остаточный аммоний, запас автотрофной биомассы и требуемая интенсивность аэрации. Это позволяет заранее исключить биологически неработоспособные и энергетически избыточные режимы.

Наиболее безопасной начальной настройкой является $DO_{зад} = 2$ мг O_2 /л при $SRT = 15\text{--}20$ сут. После накопления эксплуатационных данных уставку можно постепенно снижать к 1 мг O_2 /л, контролируя S_{NH} на выходе, долю времени на верхнем ограничении kLa и состояние биомассы. Если аммоний остаётся ниже 1 мг N/л, снижение уставки даёт экономию аэрации без потери качества нитрификации.

VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана и исследована замкнутая система «МБР + ПИ-регулятор DO» на основе сокращённой модели ASM1. Проведён численный эксперимент для 25 сочетаний $DO_{зад}$ и SRT . Установлено, что критерий $S_{NH,уст} \leq 1,0$ мг N/л выполняется в 16 сценариях, а сочетание низкого DO и короткого SRT приводит к вымыванию нитрифицирующей биомассы.

Показано, что повышение $DO_{зад}$ выше 2 мг O_2 /л даёт малый дополнительный выигрыш по аммонии при существенном росте аэрационной нагрузки. Увеличение SRT улучшает процесс главным образом за счёт накопления X_{BA} ; наибольшая отдача наблюдается при переходе от 5 к 10–15 сут. Параметры ПИ-регулятора $K_p = 13,063$ и $K_i = 5,00$ ч^{–1} обеспечивают устойчивый кислородный контур с запасом по фазе 94,2° и могут сохраняться во всей рекомендуемой области.

Рациональной рабочей областью является $DO_{зад} = 1\text{--}2$ мг O_2 /л при $SRT = 10\text{--}20$ сут. При приоритете энергосбережения допускается $DO_{зад} = 0,5$ мг O_2 /л при $SRT \geq 15$ сут и дополнительном контроле качества очищенной воды. Полученные результаты могут использоваться как исходный ориентир для настройки МБР с последующим уточнением параметров по натурным данным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Rahman T. U., Roy H., Islam M. R. et al. The Advancement in Membrane Bioreactor (MBR) Technology toward Sustainable Industrial Wastewater Management // Membranes. 2023. Vol. 13, No. 2. Art. 181. DOI: 10.3390/membranes13020181.
- [2] Martinez-Rabert E., Smith C. J., Sloan W. T., Gonzalez-Cabaleiro R. Biochemistry shapes growth kinetics of nitrifiers and defines their activity under specific environmental conditions // Biotechnology and Bioengineering. 2022. Vol. 119, No. 5. P. 1290–1300. DOI: 10.1002/bit.28045.
- [3] Henze M., Gujer W., Mino T., van Loosdrecht M. C. M. Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3. London: IWA Publishing, 2000. 130 p.
- [4] Huang R., Meng T., Liu G., Gao S., Tian J. Simultaneous nitrification and denitrification in membrane bioreactor: Effect of dissolved

- oxygen // Journal of Environmental Management. 2022. Vol. 323. Art. 116183. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.116183.
- [5] Wen J., LeChevallier M.W., Tao W. Nitrification kinetics and microbial communities of activated sludge as a full-scale membrane bioreactor plant transitioned to low dissolved oxygen operation // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 248. Art. 119872. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119872.
- [6] Gasmi A., Heran M., Elboughdiri N. et al. Steady state modeling of autotrophic membrane bioreactor — a new approach to quantify biomass // Arab Gulf Journal of Scientific Research. 2024. Vol. 42, No. 3. P. 920–941. DOI: 10.1108/AGJSR-02-2023-0044.
- [7] Mofatto P. M. B., Cosenza A., Di Trapani D., Mannina G. IFAS intermittent aeration membrane bioreactor system: The influence of sludge retention time // Journal of Environmental Management. 2025. Vol. 379. Art. 124710. DOI: 10.1016/j.jenvman.2025.124710.
- [8] Mannina G., Cosenza A., Reboucas T. F. Aeration control in membrane bioreactor for sustainable environmental footprint // Bioresource Technology. 2020. Vol. 301. Art. 122734. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.122734.
- [9] Arumugham T., Khudzari J., Abdullah N. et al. Research trends and future directions on nitrification and denitrification processes in biological nitrogen removal // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2024. Vol. 12, No. 2. Art. 111897. DOI: 10.1016/j.jece.2024.111897.

Разработка нейросетевой системы визуального позиционирования захвата манипулятора

Е. А. Попов

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)*

yegorpopov40@gmail.com

Аннотация. Рассматривается разработка нейросетевой системы позиционирования захвата для шестиосевого манипулятора Arctos с использованием RGBD-камеры Intel RealSense D435. Для обнаружения ягод клубники используется модель YOLO, а для определения параметров захвата произвольных предметов по карте глубины применяется GGCNN. Описана интеграция разработанных подсистем в среде ROS 2 с использованием MoveIt, tf2. Приведены результаты испытаний в симуляции и на реальной установке.

Ключевые слова: роботизированный манипулятор; YOLO; GGCNN; ROS 2; RGBD-камера; захват объектов; карта глубины; автоматизация сбора

I. ВВЕДЕНИЕ

Автоматизация операций захвата и перемещения объектов является одной из актуальных задач современной робототехники. Особую практическую значимость такие решения приобретают в задачах сельскохозяйственной робототехники, логистики и сортировки продукции, где требуется работа в условиях изменяющейся сцены, частичной окклюзии объектов и шумов сенсорных данных [[1]].

Целью работы является повышение точности системы захвата роботизированного манипулятора за счёт применения нейросетевых методов обработки видеосигнала. Для достижения этой цели разработаны две взаимодополняющие подсистемы: система на базе YOLO для обнаружения ягод клубники и определения пространственных координат целевого объекта и система на базе GGCNN для определения центра, угла и ширины захвата произвольных предметов по карте глубины. Результаты нейросетевой обработки далее используются в контуре управления манипулятором, который включает преобразование координат, планирование движения и выполнение операции захвата.

II. ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ

Аппаратную основу комплекса составляет шестиосевой манипулятор Arctos, RGBD-камера Intel RealSense D435 и нижний уровень управления на базе Arduino Mega 2560 с драйверами TB6560. Верхний уровень управления реализован на ноутбуке, на котором запускаются ROS 2-ноды, нейросетевые модели, алгоритмы обработки изображений и средства планирования движения. Такое разделение позволяет вынести вычислительно сложные алгоритмы на верхний уровень, а низкоуровневое управление приводами оставить за микроконтроллером.

ROS 2 в разработанной архитектуре выступает как среда интеграции независимых узлов, обменивающихся сообщениями через топики и параметры. Отдельные узлы выполняют получение RGB- и depth-данных, нейросетевую обработку, вычисление координат объекта, преобразование между системами отсчёта и запуск планировщика движения. Для повышения устойчивости вычисления глубины в целевой точке применялись локальная медианная оценка и экспоненциальное сглаживание EMA. Такая архитектура обеспечивает переход от восприятия сцены к формированию управляющего воздействия в едином программно-аппаратном контуре. Общий вид манипулятора представлен на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид объекта управления

III. СИСТЕМА НА БАЗЕ YOLO

Одной из востребованных прикладных задач роботизированного манипулирования является автоматизированный сбор ягод, в частности клубники [2], [3]. Для решения задачи автоматизированного сбора ягод клубники использовалась модель YOLOv8. На вход модели подаётся цветное изображение сцены, а на выходе формируются ограничивающие прямоугольники, confidence и классы объектов. По центру найденного объекта и значению глубины в соответствующей точке вычисляются пространственные координаты ягоды в системе камеры, после чего они преобразуются в систему координат манипулятора. Пример визуализации детекции спелых и неспелых ягод представлен на рис. 2.

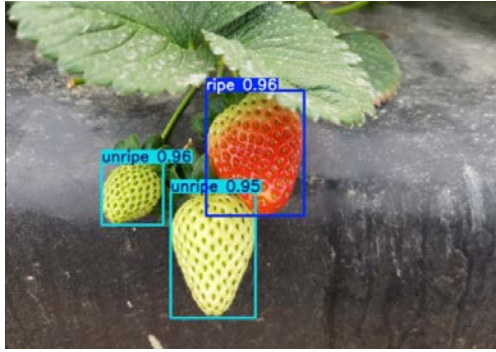


Рис. 2. Визуализация детекции ягод клубники моделью YOLO

Для обучения детектора использовались открытый датасет StrawDI и собственный набор тепличных изображений. Поскольку StrawDI исходно размечен для сегментации, была выполнена конвертация масок объектов в формат детекции YOLO. Дополнительно применялся трекинг ByteTrack, который позволял сопровождать выбранную ягоду между кадрами и уменьшать влияние кратковременных пропусков детекции на вычисление координат цели. Гиперпараметры обучения приведены в табл. I.

ТАБЛИЦА I.

Гиперпараметр	Значение
epochs	20
imgsz	640
batch	16
device	cuda
optimizer	AdamW

Оценка качества обученной модели YOLO выполняется путём прогона обученной сети на тестовой выборке датасета с известной разметкой. Полученные предсказания сравниваются с ground truth по критерию IoU, после чего вычисляются метрики precision, recall и mAP. Результаты приведены в табл. II и на рис. 3.

ТАБЛИЦА II.

Метрика	Результат на тестовой выборке
Precision	0.933297
Recall	0.935176
mAP50	0.966821
mAP50-95	0.869680

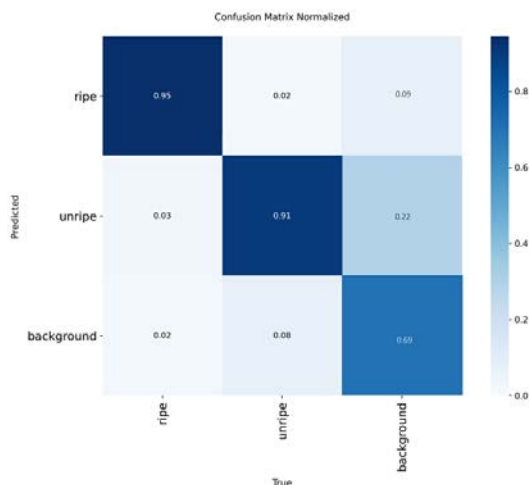


Рис. 3. Нормализованная матрица предсказаний классов

IV. СИСТЕМА НА БАЗЕ GGCNN

Для захвата произвольных предметов использовалась модель GGCNN, работающая с картой глубины [1]. Входом сети является одноканальное depth-изображение, а выходом – плотные карты параметров захвата: карта качества, карты ориентации $\cos(2\theta)$ и $\sin(2\theta)$, а также карта ширины захвата. По максимуму карты качества выбирается наиболее перспективная конфигурация, после чего вычисляются центр захвата, угол ориентации, ширина раскрытия и оценка качества результата. Схематичное изображение работы модели приведено на рис. 4.

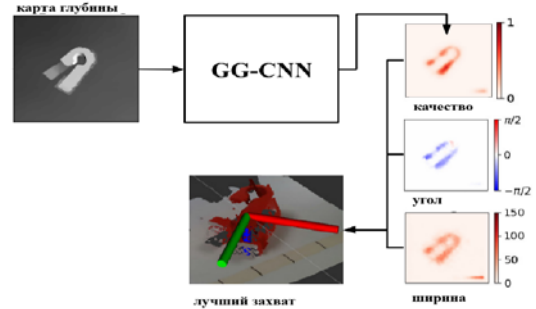


Рис. 4. Схема работы GGCNN

Обучение модели проводилось на датасетах Cornell, Jacquard и на смешанном датасете Cornell + Jacquard [4]. Для оценки использовалась rect-metric – доля изображений, на которых предсказанный grasp-прямоугольник удовлетворяет условиям совпадения с эталонной разметкой. Наилучшие показатели (0.79) были получены для модели, обученной на смешанном датасете, что указывает на положительный эффект объединения реальных и синтетических данных, как показано в табл. III.

ТАБЛИЦА III.

Обучающий датасет	Rect-metric
Cornell	0,69
Jacquard	0,74
Cornell + Jacquard	0,79

V. ИНТЕГРАЦИЯ СИСТЕМ ЗРЕНИЯ И ФИЛЬТРАЦИЯ ДАННЫХ

Подсистемы на базе YOLO и GGCNN были интегрированы в общий контур управления манипулятором с использованием ROS2. Пространственные координаты точки в смешанном датасете вычислялись по выражениям:

$$X = (u - cx) \frac{Z}{f_x}$$

$$Y = (v - cy) \frac{Z}{f_y}$$

$$Z = Z$$

После получения координат объекта или параметров захвата выполнялось преобразование координат через tf2, формирование целевой позы схвата, решение задачи обратной кинематики и планирование движения средствами MoveIt. Обратная задача кинематики – ОЗК, заключается в расчете обобщенных координат при заданных линейных и угловых координатах рабочего органа манипулятора. Эта задача является более сложной,

чем ПЗК, поскольку может вести к неопределенности решения, т.е. одному и тому же набору положению рабочего органа в пространстве могут соответствовать разные конфигурации робота. Кроме того, решение ОЗК существенно зависит от конструкции манипулятора, что исключает возможность разработки единого способа решения ОЗК в общем случае для всех типов роботов [5].

Логика работы системы была организована в виде конечного автомата состояний, включающего этапы обнаружения цели, подтверждения координат, планирования, подведения схвата, захвата и переноса.

Для уменьшения шумов измерения глубины использовалась двухступенчатая фильтрация [6].

$$Z_{med}(u,v)=\text{median}\{Z(i,j)|(i,j)\in\Omega_{uv}\}$$

Затем полученное значение сглаживалось экспоненциальным фильтром ЕМА (2).

$$z_t^{EMA}=az_t+(1-a)z_{t-1}^{EMA}$$

Переход автомата в следующее состояние выполнялся только при наличии нескольких последовательных валидных кадров и стабилизации значения глубины. Это повышало устойчивость вычисления координат и уменьшало дрожание целевой точки.

В симуляционной среде Gazebo была реализована модель сцены и объекта захвата. Успешность операции оценивалась по факту контакта гриппера с объектом и его удержанию после закрытия схвата. Использование фильтрации depth-данных уменьшило дрожание вычисляемой координаты цели, а применение нейросетевых подсистем позволило повысить точность и устойчивость работы системы в целом.

VI. РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментальная проверка разработанной системы проводилась как в симуляционной среде Gazebo, так и на реальной установке. Для оценки эффективности в симуляции использовался формализованный критерий успешного захвата. Успешная операция фиксировалась при наличии корректного взаимодействия гриппера с объектом в состоянии захвата и последующей публикации соответствующего сообщения в ROS 2-топик формирования отчёта. Такой подход позволял автоматически регистрировать результат выполнения без участия оператора. В рамках серии симуляционных испытаний оценивались такие показатели, как доля

успешных захватов, случаи потери объекта и число ситуаций, в которых не удавалось построить траекторию. Ошибка планирования могла возникать, если целевая точка находилась близко к границе рабочей зоны или требуемая ориентация захвата оказывалась неудобной с точки зрения ограничений по суставам манипулятора. Для тестирования системы на базе YOLO в рабочей зоне размещались 3D-модели ягод клубники, а для системы на базе GGCNN – модели предметов различной формы, включая кружку, щётку, ручку и другие объекты. Работа манипулятора в теплице и симуляторе Gazebo представлена на рис. 5 и 6.



Рис. 5. Работа манипулятора в теплице

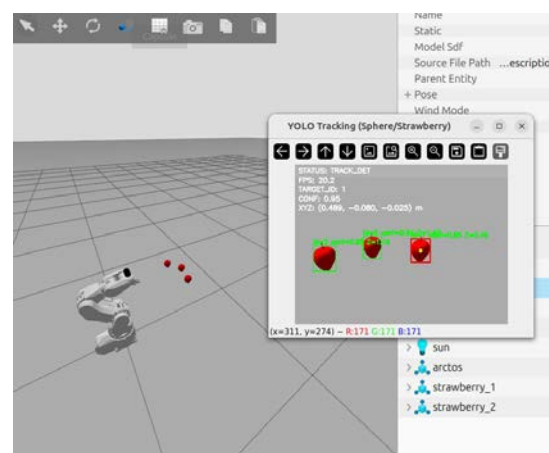


Рис. 6. Работа манипулятора в симуляторе

Результаты испытаний в симуляторе приведены в табл. IV.

ТАБЛИЦА IV.

Модель	Число попыток	Успешные захваты	Ошибки детекции	Ошибки планирования	Доля успешных захватов, %
YOLO	30	27	1	2	90.0
GGCNN	30	26	2	2	86.7

Результаты испытаний в реальности приведены в табл. V.

ТАБЛИЦА V.

Система захвата	Число попыток	Успешные захваты	Неуспешные захваты	Доля успешных захватов, %
YOLO	20	15	4	75.0
GGCNN	30	24	6	80.0

При этом также снижение доли успешных захватов объясняется более сложным фоном сцены, вариативностью расположения объектов, более

непредсказуемым шумом в сравнении с симуляцией. Но тем не менее, полученный результат оказался на 2% выше чем в оригинальной работе [1].

VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы была разработана система позиционирования захвата роботизированного манипулятора на основе нейросетевых методов обработки видеосигнала. Полученные результаты позволяют сделать вывод о достижении поставленной цели – повышении точности системы захвата роботизированного манипулятора за счёт применения нейросетевых методов обработки видеосигнала.

В рамках работы была подготовлена обучающая выборка и реализовано обучение модели YOLO, предназначенной для обнаружения ягод клубники по видеосигналу.

Для решения задачи захвата произвольных предметов была подготовлена обучающая выборка и реализовано обучение модели GGCNN, определяющей параметры захвата по карте глубины. Показано, что данная модель позволяет формировать центр захвата, угол ориентации, ширину раскрытия захвата и оценку качества захвата, что делает её пригодной для использования в контуре управления манипулятором.

Разработана подсистема позиционирования на базе фреймворка ROS 2, в рамках которой были объединены нейросетевые алгоритмы, подсистема зрения, вычисление координат, планирование движения и управление манипулятором представленная в виде конечного автомата.

Перспективным направлением дальнейших исследований является объединение манипулятора с мобильной платформой и перенос верхнего уровня вычислений на интегрированный контроллер Rockchip RK3588, внедрение энкодеров и реализация полноценной СУ с обратной связью, а также расширение набора сценариев захвата для более сложных и динамических объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Morrison D., Corke P., Leitner J. Closing the Loop for Robotic Grasping: A Real-time, Generative Grasp Synthesis Approach GG-CNN. arXiv:1804.05172, 2018.
- [2] Wang C. et al. A Review of Perception Technologies for Berry Fruit-Picking Robots. // Agriculture, 2024.
- [3] Xiong Y. et al. Development and Field Evaluation of a Strawberry Harvesting Robot with a Cable-Driven Gripper. // Computers and Electronics in Agriculture, 2019.
- [4] Depierre A., Dellandréa E., Chen L. Jacquard: A Large Scale Dataset for Robotic Grasp Detection. arXiv:1803.11469, 2018.
- [5] Борисов О.И., Громов В.С., Пыркин А.А. Методы управления робототехническими приложениями: уч. пособие, СПб.: Университет ИТМО, 2016. 108 с.
- [6] Anwar Shah, Javed Iqbal Bangash, Abdul Waheed Khan, Imran Ahmed, Abdullah Khan. Comparative analysis of median filter and its variants for removal of impulse noise from gray scale images. // Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences. March 2022, Volume 34, Issue 3, P. 505-519.

Параметрическая идентификация математической модели управляемого роста опухолевых клеток при персонализированном лечении онкологического заболевания

В. В. Потлова

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

varusha_potlova@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается задача параметрической идентификации математической модели управляемого роста опухолевых клеток при персонализированном лечении онкологического заболевания. Предложен алгоритм, сочетающий численное решение дифференциальных уравнений и градиентную оптимизацию. Проведено тестирование подхода на модельных примерах, оценена точность восстановления параметров.

Ключевые слова: параметрическая идентификация; персонализированное лечение; математическое моделирование; онкологическое заболевание

I. ВВЕДЕНИЕ

Онкологические заболевания остаются одной из ведущих причин смертности населения [1]. Ключевая проблема современной онкологии заключается в том, что пациенты по-разному реагируют на стандартные схемы лечения: у одних наступает полная ремиссия, а у других болезнь прогрессирует, возникают тяжелые побочные реакции при отсутствии лечебного эффекта.

Переход к персонализированной медицине учитывает индивидуальные особенности пациента для прогнозирования ответа на лечение до его начала [1]. Математическое моделирование динамики взаимодействия опухоли и иммунной системы позволяет количественно оценить влияние терапевтических воздействий.

Актуальность работы подтверждается также тем, что в условиях ограниченных ресурсов здравоохранения разработка методик прогнозирования ответа на лечение становится не просто научной задачей, а социально значимым направлением, способным снизить экономические и социальные издержки.

Целью работы является разработка и сравнительная оценка двух алгоритмов параметрической идентификации математической модели «опухоль–иммунитет», обеспечивающих персонализированное прогнозирование динамики заболевания при комбинированной терапии.

II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

В качестве основы рассматривается модифицированная система обыкновенных

дифференциальных уравнений (ОДУ), полученная на основе базовой модели Лотки–Вольтерры, но адаптированная для описания взаимодействия опухолевых и иммунных клеток [3]:

$$\begin{cases} \frac{dT}{dt} = r \cdot T \cdot \left(1 - \frac{T}{K}\right) - \alpha \cdot T \cdot I - \eta_c \cdot u(t) \cdot T, \\ \frac{dI}{dt} = s + \frac{\rho \cdot T \cdot I}{h + T} - \delta \cdot I - \mu \cdot T \cdot I + \eta_I \cdot v(t), \end{cases}$$

где $T(t)$ – объём опухоли (мм³), $I(t)$ – концентрация клеток иммунной системы (кл/мкл); r, K – параметры роста опухоли (скорость и ёмкость среды); α, δ, μ – параметры иммунного ответа (уничтожение, естественная гибель, супрессия); s, ρ, h – параметры активации иммунитета; $u(t), v(t)$ – управляющие воздействия (химио- и иммунотерапия); η_c, η_I – коэффициенты эффективности терапии.

III. ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ

A. Метод наименьших квадратов

Реализация классического метода наименьших квадратов (МНК) была выполнена в виде двухэтапной процедуры [2]. Первый этап отвечает за глобальный поиск, чтобы избежать попадания в локальные минимумы, которые являются обычным явлением для нелинейных функций. На первом этапе используется метод дифференциальной эволюции. Этот стохастический алгоритм работает с популяцией клеток и использует операции мутации и кроссовера для поиска области глобального минимума. Он не требует вычисления производных и устойчив к разрывам и шумам в целевой функции. В рамках эксперимента был задан размер популяции 50 особей и количество поколений 100, что обеспечило достаточную глубину глобального поиска без чрезмерных вычислительных затрат.

Второй этап представляет собой локальное уточнение полученного решения с помощью МНК. Данный метод быстро сходится в окрестности глобального минимума, гарантируя высокую точность итоговых оценок. Сочетание глобального и локального поиска позволяет получить решение, которое одновременно является глобально оптимальным и численно точным.

Функция стоимости была получена на основе взвешенного метода наименьших квадратов [5]:

$$J(\theta) = \sum_{i=1}^n \left[\omega_T^2 (\ln(T_i^{\text{мод}} + \varepsilon_1) - \ln(T_i^{\text{дан}} + \varepsilon_1))^2 + \frac{\omega_I^2}{(\bar{I} + \varepsilon_2)^2} (I_i^{\text{мод}} - I_i^{\text{дан}})^2 \right],$$

где $T_i^{\text{мод}}, I_i^{\text{мод}}$ – решение модели ОДУ при текущих параметрах θ , $T_i^{\text{дан}}, I_i^{\text{дан}}$ – экспериментальные данные, $\varepsilon_1 = 10^{-3}$ – отступ для устойчивости логарифма, $\bar{I} = \frac{1}{n} \sum I_i^{\text{дан}}$ – среднее значение иммунитета, $\varepsilon_2 = 10^{-6}$ –

защита от деления на ноль, ω_T и ω_I – веса заданные в функции невязки, которые позволяют балансировать вклад объема опухоли и концентрации иммунных клеток в общий функционал. Это необходимо, поскольку переменные T и I имеют разные масштабы и уровни шума, и их прямое суммирование без нормализации привело бы к доминированию одного из них в процессе оптимизации.

Результаты применения МНК представлены графиками на рис. 1.

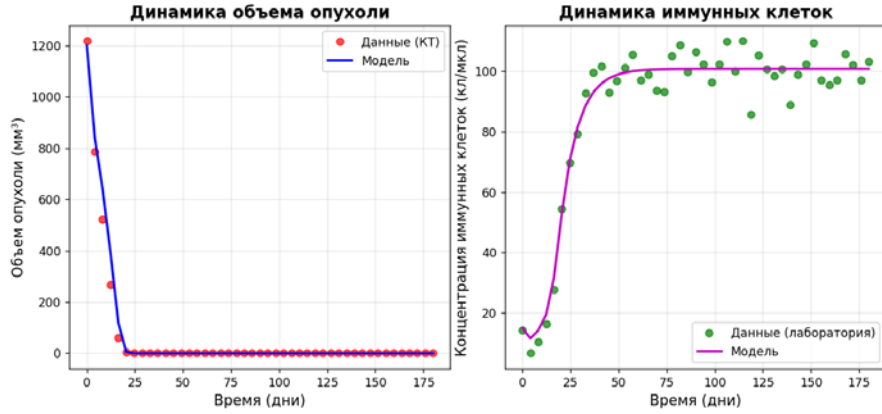


Рис. 1. Результаты метода наименьших квадратов

В. Метод PINNs

В качестве альтернативного подхода рассматривается нейросетевая архитектура PINNs (Physics-Informed Neural Networks) [4]. В данном методе нейронная сеть обучается не только на данных (Data Loss), но и на соблюдении физических законов, описываемых дифференциальными уравнениями (Physics Loss). Основным отличием от обычных нейросетей является то, что все параметры модели (коэффициенты ОДУ)

объявлены как nn.Parameter. Это означает, что они становятся обучаемыми переменными, по которым PyTorch будет вычислять градиенты в процессе обратного распространения ошибки. Таким образом, оптимизация осуществляется одновременно по весам нейронной сети и по параметрам дифференциальных уравнений. Результаты применения данного подхода представлены на рис. 2.

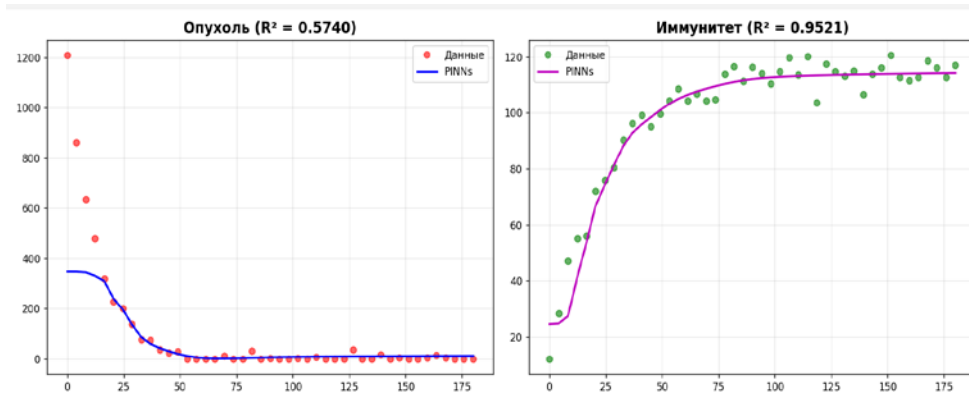


Рис. 2. Результаты метода PINNs

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Идентификация проводилась на наборе данных, имитирующих клинический мониторинг пациента в течение курса лечения (45 точек измерений).

Классический метод позволил идентифицировать все параметры модели с высокой точностью. Коэффициент детерминации для динамики опухоли составил $R^2 \approx 0.98$, для иммунитета $R^2 \approx 0.96$. Найденные параметры имеют четкую биологическую интерпретацию.

Метод PINNs продемонстрировал высокую точность аппроксимации динамики иммунных клеток ($R^2 \approx 0.95$), однако для динамики опухоли показатель оказался ниже ($R^2 \approx 0.57$). Выявлена проблема «коллапса параметров»: часть коэффициентов (например, r, α) стремилась к нулю, так как сеть компенсировала ошибку физики за счет гибкости аппроксимации данных.

Сравнительный анализ показывает, что при малом объеме выборки классические методы оптимизации обеспечивают более устойчивую и интерпретируемую

идентификацию, в то время как PINNs требуют значительно большего количества данных или модификации функции потерь.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика параметрической идентификации модели управляемого роста опухоли. Доказана эффективность классического комбинированного алгоритма для задач персонализированной медицины, где объем данных ограничен. Метод PINNs показал потенциал как инструмент аппроксимации, однако его прямое применение для идентификации параметров требует дальнейших исследований в области регуляризации.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Благодарность выражается д.т.н., профессору кафедры АПУ СПбГЭТУ «ЛЭТИ» Душину С.Е. за помощь в подготовке доклада; к.т.н., доценту кафедры АПУ СПбГЭТУ «ЛЭТИ» Кораблёву Ю.А. за возможность публикации материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Рак — вторая по распространенности причина смерти во всем мире. Как с этим борются в России // Московские новости URL: <https://www.mn.ru/smart/rak-vtoraya-po-rasprostranennosti-prichina-smerti-vo-vsem-mire-kak-s-etim-boryutsya-v-rossii> (дата обращения: 01.05.2026).
- [2] Кулаков М.П., Хавинсон М.Ю. Подход к параметрической идентификации систем обыкновенных дифференциальных уравнений // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. 2013. № 4. С. 113–123
- [3] De Pillis L.G., Radunskaya A.E. A Mathematical Model of Immune Response to Tumor Invasion // Computational Medicine for the Detection, Treatment and Monitoring of Cancer and Other Diseases. Springer, 2005. P. 137–159.
- [4] Raissi M., Perdikaris P., Karniadakis G.E. Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations // Journal of Computational Physics. 2019. Vol. 378. P. 686–707.
- [5] Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. Оценивание параметров и состояния. М.: Мир, 1975. 681 с.

Алгоритмы целевой рассылки и рейтинговой оценки в веб-системах управления спортивными объектами

М. А. Смирнов

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

smirnov.mfksim@mail.ru

Р. Е. Спиридонов

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

rom@nspiridonov.ru

Аннотация. В работе рассматривается проблема финансовых потерь спортивных площадок из-за неподтвержденных бронирований и снижения лояльности аудитории вследствие массовых нецелевых рассылок. Предложены и реализованы алгоритмы автоматического освобождения слотов и умной адресной рассылки, учитывающей индивидуальные графики доступности игроков. Разработана подсистема автоматического пересчета рейтинга на базе модели Эло для подбора спарринг-партнеров. Экспериментально подтверждена 100% точность алгоритма адресной рассылки и высокая сходимость рейтинговой оценки.

Ключевые слова: веб-приложение; бронирование; система Эло; адресная рассылка; спортивные объекты; клиент-серверная архитектура

I. ВВЕДЕНИЕ

Сфера любительского спорта демонстрирует устойчивый рост. Переход к цифровым платформам управления расписанием спортивных объектов (теннисных кортов, фитнес-центров) стал индустриальным стандартом: доля онлайн-бронирований в 2024 году достигла 71% [1]. Однако спортивные площадки продолжают нести убытки из-за проблемы «оплаченных, но непосещенных» или «неподтвержденных» слотов. Три отказа в день на типичном теннисном корте могут приводить к потерям до 200 тыс. руб. в месяц.

Существующие решения (Playtomic, MATCHi, Yclients, Skedda) предлагают различные схемы управления бронированиями, но не закрывают комплексную задачу: автоматическое освобождение брони в день игры сопряженное с адресной рассылкой уведомлений [2, 3]. В большинстве систем реализована общая рассылка по факту подписки, что приводит к перегрузке пользователей нерелевантными уведомлениями (спамом) и их последующему отключению. Целью данной работы является разработка и исследование алгоритмов целевой рассылки и рейтинговой оценки, интегрированных в единую клиент-серверную систему бронирования.

II. АРХИТЕКТУРА И АЛГОРИТМ ЦЕЛЕВОЙ РАССЫЛКИ

Разработанное программное решение построено на базе трехзвенной архитектуры: SPA-клиент (React), REST API сервис (Node.js, Express) и реляционная СУБД (PostgreSQL). Для предотвращения простоя кортов реализован алгоритм двухступенчатого бронирования.

Бронь создается в статусе «ожидает подтверждения». Если игрок не подтверждает свое участие, планировщик задач (cron) автоматически освобождает слот ровно в 09:00 в день предполагаемой игры [4].

Освобождение слота запускает алгоритм умной адресной рассылки. Вместо массового информирования всех подписчиков клуба, алгоритм выполняет фильтрацию профилей. Для каждого игрока в БД хранится массив availableDays – индивидуальный график доступности (дни недели). Алгоритм сопоставляет день недели освобожденного слота с массивом каждого пользователя и отправляет уведомление строго целевой аудитории. Сложность алгоритма составляет $O(N)$, где N – количество профилей на площадке, а применение СУБД позволяет выполнять первоначальную фильтрацию за один проход.

III. РЕЙТИНГОВАЯ ОЦЕНКА И ПОДБОР СПАРРИНГ-ПАРТНЕРОВ

Дополнительной проблемой любительского спорта является поиск партнера сопоставимого уровня игры. Для автоматизации этого процесса разработана спарринг-биржа со встроенным мессенджером и математической моделью пересчета рейтинга. За основу была взята классическая система Эло [5] с базовым значением 1000 и коэффициентом $K=32$.

Ожидаемый результат (E) игрока A против игрока B рассчитывается по формуле:

$$E(A) = \frac{1}{1 + 10^{(R(B) - R(A)) / 400}},$$

где $R(A)$ и $R(B)$ — текущие рейтинги игроков. После фиксации результатов матча новые значения пересчитываются с учетом коэффициента K . Транзакционная модель Prisma ORM обеспечивает строгое соблюдение атомарности операции, обновляя рейтинги победителя и проигравшего в едином блоке.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальная проверка алгоритмов проводилась на тестовом стенде с процессором AMD Ryzen 7 7800X3D и СУБД PostgreSQL 16. Оценка пропускной способности REST-интерфейса показала способность обрабатывать до 287 запросов в секунду при медианной латентности 24,8 мс.

Тестирование конкурентного бронирования подтвердило строгую атомарность: при 100 одновременных POST-запросах на один слот система создает ровно одну бронь, отвергая остальные 99 запросов, что исключает появление дубликатов в базе данных.

Алгоритм адресной рассылки продемонстрировал 100% точность ($Precision = 1.0$) и полноту ($Recall = 1.0$) на тестовой выборке из 100 синтетических профилей. По сравнению со слепой массовой рассылкой, целевая фильтрация сократила накладные расходы на отправку сообщений в 1,77 раза.

Исследование сходимости рейтинга Эло выполнялось путем симуляции 200 матчей между 20 агентами с известной «истинной силой». После 100 матчей медианное значение коэффициента ранговой корреляции Спирмена составило 0,94. Это на 32% точнее, чем простое ранжирование по проценту побед, что подтверждает высокую эффективность применения Эло в рамках любительских спортивных площадок.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные алгоритмы решают критические проблемы систем бронирования спортивных объектов.

Внедрение целевой адресной рассылки на основе индивидуальных графиков игроков позволило минимизировать информационный шум, сохраняя высокую заполняемость кортов после автоматического освобождения слотов. Математическая модель рейтинга обеспечивает честный и прозрачный матчмейкинг. Реализация системы в архитектуре Node.js и PostgreSQL подтвердила высокую отказоустойчивость и пригодность для промышленной эксплуатации в спортивных клубах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Sports Coaching in the US: Industry Market Research Report. – IBISWorld, 2024. – URL: <https://www.ibisworld.com/united-states/market-research-reports/sports-coaching-industry/> (дата обращения: 28.04.2026). – Text: electronic.
- [2] Playtomic: Help Center / Playtomic SL. – Madrid, 2025. – URL: <https://playerhelp.playtomic.com/> (дата обращения: 28.04.2026). – Text: electronic.
- [3] MATCHi: Help Center / MATCHi AB. – Gothenburg, 2025. – URL: <https://help.matchi.se/> (дата обращения: 28.04.2026). – Text: electronic.
- [4] node-cron: Cron-like scheduler for Node.js / Lucas Merencia. – 2025. – URL: <https://github.com/node-cron/node-cron> (дата обращения: 28.04.2026). – Text: electronic.
- [5] Elo A.E. The rating of chessplayers, past and present. – New York: Arco Publishing, 1978. 206 p.

Разработка системы управления аэрацией для оптимизации нитрификации в мембранном биореакторе

М. В. Смирнова

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

marusmirnowa@gmail.com

Аннотация. Рассматривается задача оптимизации энергозатрат на аэрацию в мембранном биореакторе при обеспечении нормативного качества очистки по аммонийному азоту. Предложена математическая модель аэробной зоны нитрификации на основе ASM1, дополненная зависимостью поступления кислорода от расхода воздуха. Выполнен выбор трубчатых диффузоров и компрессорного оборудования с частотным регулированием. Разработана система автоматического управления с ПИ-регулятором, компенсатором по аммонийной нагрузке и адаптивным переключением режимов. Показано, что комбинированная стратегия позволяет снизить энергопотребление при малых нагрузках и ускорить нитрификацию при высоких нагрузках.

Ключевые слова: мембранный биореактор; нитрификация; аэрация; растворённый кислород; аммонийный азот; система управления; математическое моделирование; ASM1

I. ВВЕДЕНИЕ

Современная экологическая ситуация требует внедрения ресурсосберегающих технологий очистки сточных вод. Мембранные биореакторы (МБР) обеспечивают глубокое удаление органических и азотсодержащих соединений, однако до 60–70 % общего энергопотребления очистных сооружений приходится на аэрацию [1]. Избыточная подача воздуха не улучшает качество очистки, а недостаточная снижает эффективность нитрификации [2, 3]. Цель работы — оптимизация энергозатрат на аэрацию в МБР при сохранении нормативного качества очистки по азотсодержащим соединениям. В работе рассматривается аэробная зона четырёхзонного процесса A²/O (рис. 1), где происходит окисление аммония до нитратов.

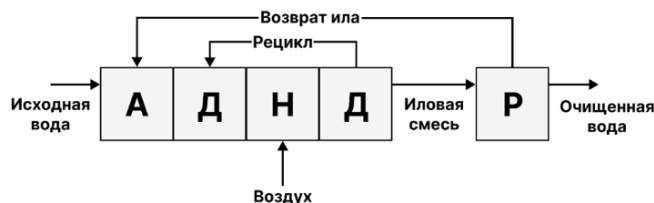
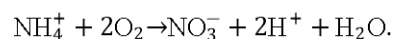


Рис. 1. Технологическая структура процесса A²/O

II. ПРОЦЕСС НИТРИФИКАЦИИ КАК ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ

Нитрификация — двухстадийное окисление аммонийного азота аэробными микроорганизмами [4]. На первой стадии бактерии рода *Nitrosomonas* окисляют NH_4^+ до NO_2^- , на второй — бактерии *Nitrobacter* окисляют NO_2^- до NO_3^- . Суммарная реакция нитрификации имеет вид [5]:



Растворённый кислород (DO) является критически важным фактором. При концентрации 1,0–1,5 мг/л рост микроорганизмов происходит только на периферии хлопьев активного ила, рабочим считается диапазон 2,0–2,5 мг/л, а повышение до 4,0 мг/л увеличивает рост лишь на 20 %, что энергетически нецелесообразно [5]. Аммонийный азот выступает исходным субстратом, его концентрация в городских сточных водах составляет 8,8–70,0 мг/л [5]. Нитраты и нитриты не рассматриваются в качестве основного индикатора для управления аэрацией, поскольку их динамика искажается процессами денитрификации и рециклами [4, 6]. Таким образом, регулируемые переменными выбраны концентрация растворённого кислорода (инструмент управления) и концентрация аммонийного азота (показатель эффективности).

III. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НИТРИФИКАЦИИ

В качестве расчётной основы использована модель активного ила ASM1, предложенная Хенце и соавторами [7], адаптированная к аэробной зоне МБР. Процесс описывается как одностадийное окисление аммония до нитрата без учёта промежуточного нитрита и денитрификации. Концептуальная схема модели приведена на рис. 2. Система нелинейных дифференциальных уравнений реализована в среде MATLAB/Simulink.

Исследование установившихся режимов при ступенчатых возмущениях показало, что изменение входной концентрации аммонийного азота в диапазоне от 8,9 до 26,7 г/м³ приводит к росту остаточной концентрации аммония с 6,58 до 24,36 г/м³ и увеличению времени регулирования с 81,6 до 92,5 сут, однако скорость нитрификации меняется незначительно из-за насыщения кинетики Моно.

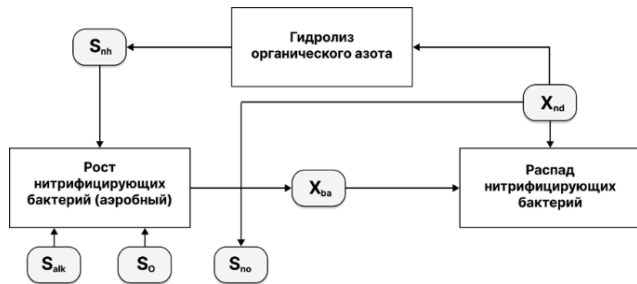


Рис. 2. Концептуальная схема процесса нитрификации

В отличие от этого, изменение входной концентрации растворённого кислорода с 5 до 80 г/м³ вызывает снижение остаточного аммония с 16,5 до 0,12 г/м³ и рост скорости нитрификации более чем в семь раз. Кислород оказывает двойное влияние: через множитель $S_o/(S_o + K_o)$ и через рост биомассы нитрификаторов. Растворённый кислород выбран в качестве регулируемой величины, а аммонийный азот — как возмущение, на которое система должна реагировать изменением режима аэрации.

IV. СВЯЗ АЭРАЦИИ С КИСЛОРОДНЫМ РЕЖИМОМ

Для описания поступления кислорода от диффузоров в модель введён дополнительный член, учитывающий аэрацию. Предельная растворимость кислорода зависит от температуры и описывается зависимостью, полученной на основе данных [8]. Скорость прироста концентрации растворённого кислорода за счёт аэрации выведена из материального баланса и закономерностей массопереноса [9]:

$$r_{\text{аэр}} = 10^3 \cdot \frac{Q_{\text{air}} \cdot n \cdot \rho_{\text{air}} \cdot Y_{O_2}}{V} \cdot \frac{SOTE \cdot h}{100} \cdot \frac{C_s(T) - S_o}{C_s(20)},$$

где SOTE — стандартная эффективность переноса кислорода, h — глубина погружения диффузоров, $C_s(T)$ — концентрация насыщения кислородом при температуре T.

V. ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ И ДИАПАЗОНОВ УПРАВЛЕНИЯ

В качестве аэраторов выбраны мелкопузырчатые трубчатые диффузоры TD 63/2100 D [10]. Рабочий диапазон расхода воздуха на один диффузор составляет от 3 до 12 м³/ч, рациональный — до 10 м³/ч. Зависимость стандартной эффективности переноса кислорода SOTE от расхода воздуха является линейной: $SOTE = 13 - (2/3) \cdot Q$, %/м. Это означает, что увеличение расхода воздуха снижает удельную эффективность переноса кислорода, поэтому существует рациональная область работы диффузоров.

Исследование влияния аэрации на процесс нитрификации показало, что увеличение числа диффузоров с 3 до 5 и расхода воздуха ускоряет окисление аммония, однако после определённого предела дальнейший рост расхода даёт незначительный эффект. Например, при трёх работающих диффузорах увеличение расхода воздуха с 6 до 9 м³/ч сокращает время достижения нормативной концентрации аммонийного азота (0,39 мг/л) всего на 52 минуты, тогда как расход воздуха возрастает в 1,5 раза. Зависимость установившейся концентрации растворённого кислорода от расхода воздуха имеет нелинейный характер: при малых расходах рост DO заметный, но по мере

приближения к насыщению вода хуже принимает дополнительный кислород (рис. 3).

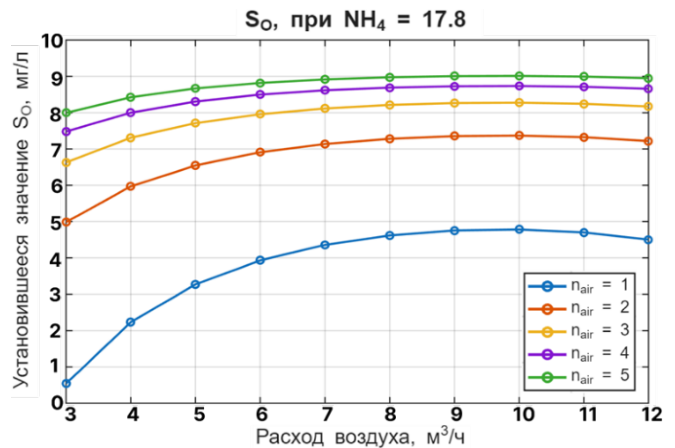


Рис. 3. Зависимость установившегося значения растворённого кислорода от расхода воздуха при различном количестве диффузоров

Для обеспечения регулируемой подачи воздуха выбраны два частотно-регулируемых компрессора Becker Variair KDT 3.80 (диапазон производительности 38,5–77 м³/ч) и KDT 3.100 (59–118 м³/ч) [11, 12]. Их совместная работа позволяет перекрыть требуемый суммарный расход воздуха от 97,5 до 195 м³/ч при рациональном расходе на один диффузор до 9,75 м³/ч. В отличие от нерегулируемых компрессоров [13], частотное регулирование обеспечивает гибкость управления и возможность плавного изменения подачи воздуха в зависимости от текущей нагрузки.

VI. СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ АЭРАЦИЕЙ

Разработана замкнутая система автоматического управления с обратной связью. Регулируемая величина — концентрация растворённого кислорода, управляющее воздействие — расход подаваемого воздуха. Входная концентрация аммонийного азота рассматривается как измеряемое возмущение.

A. Синтез регулятора и компенсатора

Линеаризация математической модели выполнена численно в окрестности номинального режима. Анализ собственных значений матрицы состояния подтвердил устойчивость рабочей точки. Для поддержания требуемой концентрации кислорода использован ПИ-регулятор, настроенный с помощью встроенного средства MATLAB pidtune. Получены следующие параметры: коэффициент усиления $K_p = 0,8713$, коэффициент интегрирования $K_i = 1,556$. Дифференциальная составляющая не применялась, поскольку объект обладает сравнительно медленной динамикой.

Для компенсации возмущений по входной концентрации аммония введён компенсатор, коэффициент которого рассчитан по отношению статических коэффициентов передачи каналов возмущения и управления: $K_{ff} = -G_d(0)/G_p(0) = 0,4811$. Это позволяет оперативно увеличивать подачу воздуха при росте аммонийной нагрузки, не дожидаясь накопления интегральной составляющей ПИ-регулятора.

В. Адаптивные механизмы

В систему управления введены три уровня адаптации. Первый – адаптивное формирование уставки по растворённому кислороду (рис. 4): при малой входной концентрации аммония ($\leq 17,8$ мг/л) уставка принимается равной 2 мг/л, при средней (17,8–48,9 мг/л) – 3 мг/л, при высокой ($\geq 48,9$ мг/л) – 4 мг/л. Второй – переключение количества работающих диффузоров в зависимости от текущей аммонийной нагрузки: при $SNH \leq 6$ г/м³ работают 3 диффузора, при $6 < SNH \leq 17 - 4$, при $SNH > 17 - 5$. Третий – отключение компрессора после достижения нормативной концентрации аммония (0,39 мг/л) с гистерезисом (включение при 0,3 мг/л, отключение при 0,22 мг/л), что позволяет снизить энергозатраты в установившемся режиме.

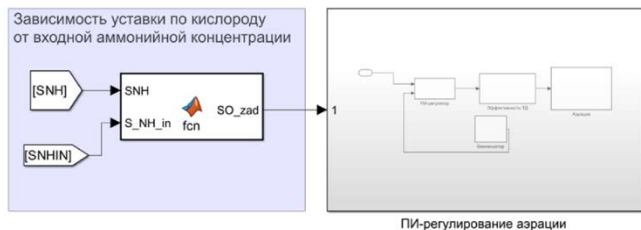


Рис. 4. Адаптивное регулирование уставки растворённого кислорода

В модель также введены ограничения расхода воздуха, согласованные с выбранными компрессорами: минимальный расход 9,625 м³/ч, максимальный – 48,75 м³/ч. При выходе управляющего сигнала за эти пределы включается механизм сброса интегральной составляющей ПИ-регулятора, что предотвращает перерегулирование и повышает устойчивость системы.

С. Сравнение режимов управления

Выполнено сравнение шести режимов управления (от отсутствия регулятора до полной адаптации) при трёх значениях входной концентрации аммонийного азота: 17,8; 48,9 и 80 мг/л. Оценка проводилась по трём критериям: время достижения нормативной концентрации аммония (0,39 мг/л), установившаяся концентрация растворённого кислорода и расход электроэнергии компрессорами.

При низкой нагрузке (17,8 мг/л) все режимы обеспечивают время нитрификации около 12 сут, однако энергопотребление в режиме с отключением компрессора составляет 356,6 кВт·ч против 720,3 кВт·ч в режиме без регулирования – экономия в два раза. При этом установившаяся концентрация растворённого кислорода в непрерывных режимах достигает 6,6–6,8 мг/л, что избыточно для последующей денитрификации [14].

При средней нагрузке (48,9 мг/л) различия становятся более заметными. Режим без регулирования даёт наименьшее время нитрификации (12,8 сут), но сопровождается высоким энергопотреблением (24580 кВт·ч). Режимы с ПИ-регулятором и адаптацией позволяют снизить энергозатраты более чем в два раза при умеренном увеличении времени очистки до 18–20 сут.

При высокой нагрузке (80 мг/л) режим без управления не справляется (время нитрификации 38,5 сут). Ускоренный режим (ПИ-регулятор + компенсатор + адаптивная уставка + 5 диффузоров) сокращает время до

17,5 сут при энергозатратах 1853 кВт·ч. На рис. 5 показана динамика концентрации аммонийного азота для различных режимов управления при высокой нагрузке.

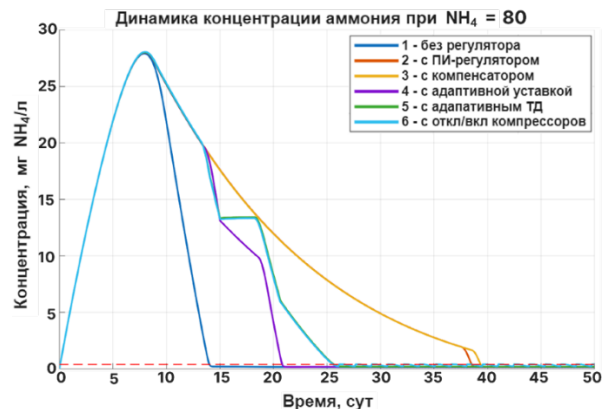


Рис. 5. Динамика концентрации аммония при различных режимах управления аэрацией

Д. Выбор оптимального режима

На основе проведённого сравнения предложена комбинированная стратегия управления.

Энергосберегающий режим применяется при низкой и умеренной аммонийной нагрузке ($SNH_{in} \leq 48,9$ мг/л). В этом режиме работают ПИ-регулятор, адаптивное переключение диффузоров и отключение компрессора после достижения нормативной концентрации аммония. Время нитрификации составляет 12,0–18,4 сут, обеспечиваются минимальные эксплуатационные затраты.

Ускоренный режим применяется при высокой нагрузке ($SNH_{in} \geq 48,9$ мг/л) или при резком росте концентрации аммония. Дополнительно включаются компенсатор по возмущению, повышенная уставка растворённого кислорода и фиксированное использование пяти диффузоров независимо от нагрузки. Время нитрификации сокращается до 11,8–17,5 сут, однако энергопотребление возрастает на 34–49% по сравнению с энергосберегающим режимом.

Переключение между режимами выполняется автоматически управляющим контроллером по сигналам датчиков аммонийного азота и растворённого кислорода. Такая структура позволяет снизить избыточную подачу воздуха при малых нагрузках и обеспечить ускорение нитрификации при повышенной нагрузке.

VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана система автоматического управления аэрацией мембранного биореактора, позволяющая поддерживать требуемую концентрацию растворённого кислорода при изменяющейся аммонийной нагрузке. Математическая модель на основе ASM1 [7] дополнена зависимостью поступления кислорода от расхода воздуха и характеристик диффузоров. Выбраны трубчатые диффузоры TD 63/2100 D [10] и частотно-регулируемые компрессоры KDT 3.80 и KDT 3.100 [11, 12]. Синтезирован ПИ-регулятор ($K_p = 0,8713$, $K_i = 1,556$) и компенсатор возмущений ($K_{ff} = 0,4811$). Реализованы адаптивные алгоритмы изменения уставки растворённого кислорода, количества работающих диффузоров и отключения компрессора. Сравнение режимов показало, что при низкой нагрузке

целесообразен энергосберегающий режим (снижение энергопотребления в два раза), а при высокой — ускоренный (сокращение времени нитрификации с 38,4 до 17,5 сут). Предложенная комбинированная система обеспечивает баланс между качеством очистки и энергозатратами.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю, кандидату технических наук, доценту Е.С. Грудяевой за ценные консультации, предоставленные материалы и поддержку на всех этапах выполнения работы.

Автор также благодарит заместителя заведующего кафедрой АПУ по учебной работе, кандидата технических наук, доцента Ю.А. Кораблева за предоставленную возможность публикации доклада в рамках Молодежной школы-семинара по проблемам управления в технических системах имени А.А. Вавилова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Мельчаков М.А. Контроль расхода воздуха при аэрации сточных вод // Актуальные задачи теории, методологии и практики научной деятельности : сборник статей Международной научно-практической конференции, 27 ноября 2022 г. Ч. 1. Новосибирск: МЦИИ ОМЕГА САЙНС, 2022. С. 50–53.
- [2] Rahman T.U., Roy H., Islam M.R. [et al.] The Advancement in Membrane Bioreactor (MBR) Technology toward Sustainable Industrial Wastewater Management [Развитие технологии мембранного биореактора (MBR) для устойчивого управления промышленными сточными водами] // Membranes. 2023. Vol. 13, № 2. Article 181. 28 p. — DOI: 10.3390/membranes13020181.
- [3] Azis K., Ntougias S., Melidis P. Real-Time Dynamic Control of Nitrification and Denitrification in an Intermittently Aerated Activated Sludge System for Enhanced Nitrogen Removal and Energy Efficiency [Динамическое управление нитрификацией и денитрификацией в режиме реального времени в системе активного ила с прерывистой аэрацией для повышения удаления азота и энергоэффективности] // Preprints.org. 2025. 15 p. Preprint, not peer-reviewed. — DOI: 10.20944/preprints202508.1511.v1.
- [4] Дубовик О.С., Маркевич Р.М., Антонов К.В. Совершенствование биологической очистки сточных вод от соединений азота и фосфора в условиях каскадной денитрификации // Водоснабжение и санитарная техника. 2019. № 2. С. 19–23.
- [5] Авдеевков П.П., Чистяков Н.Е. Факторы, влияющие на эффективность процесса нитрификации // Научные вестн. 2019. № 6(11). С. 158–160.
- [6] Шипулин Ю.Г., Махмудов М.И. Контроль и управление параметрами технологических сред в системах очистки и использования производственных сточных вод: монография. Ташкент: Fan va texnologiya, 2018. 216 с. ISBN 978-9943-11-728-00. DOI: 10.2166/9781780402369.
- [7] Henze M., Gujer W., Mino T., van Loosdrecht M. Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2D, ASM3 [Модели активного ила ASM1, ASM2, ASM2D, ASM3]. London: IWA Publishing, 2000. DOI: 10.2166/9781780402369.
- [8] Массовая концентрация растворенного кислорода в водах. Методика измерений йодометрическим методом: РД 52.24.419-2019. Введ. 2020-10-01. Ростов-на-Дону: Росгидромет, ФГБУ «Гидрохимический институт», 2019.
- [9] Грудяева Е.К. Разработка и исследование математических моделей водоочистного комплекса с мембранным биореактором как объекта управления: дис... канд. техн. наук: 05.13.06 / Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). Санкт-Петербург, 2016. 259 с.
- [10] Gummi-Jaeger GmbH. Tube Diffuser: Technical Reference [Трубчатый диффузор: техническая справка]. Hannover: Gummi-Jaeger GmbH, 2005. 4 p. — URL: <https://www.aeration-components.com> (дата обращения: 21.05.2026).
- [11] Becker. VAU KDT 3.80/0-400 Rotary Vane Compressors with Frequency Inverter: Data Sheet [Пластинчато-роторный компрессор VAU KDT 3.80/0-400 с частотным преобразователем: технический лист]. 2004. 2 p. — URL: <https://becker-russia.ru/product/kompressor/kompressor-plastinchato-rotorny-sukhie/seriya-variir-kdt-kdx-dtlf-dxlf/kdt-3-80-0-400/> (дата обращения: 21.05.2026).
- [12] Becker. KDT 3.100 Rotary Vane Compressors: Data Sheet [Пластинчато-роторный компрессор KDT 3.100: технический лист]. 2023. 5 p. — URL: <https://www.becker-international.com/de/en/products/compressors/rotary-vane-compressors-oil-free/variir-kdt3.100.htm> (дата обращения: 21.05.2026).
- [13] Becker. DT 4.40 K Rotary Vane Compressors: Data Sheet [Пластинчато-роторный компрессор DT 4.40 K: технический лист]. 2026. 5 p. — URL: <https://www.becker-international.com/de/en/products/compressors/rotary-vane-compressors-oil-free/dt4.40k.htm> (дата обращения: 21.05.2026).
- [14] Залётова Н.А. Опыт эксплуатации очистных сооружений с применением двухступенчатой схемы нитри-денитрификации // Водоснабжение и санитарная техника. 2011. № 11. С. 33–38.

Двухэтапная обработка LLM-запросов в AI-интервью для автоматизации подготовки ОТКЛИКОВ на ВАКАНСИИ

А. А. Удалов

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

art.udalov.we@yandex.ru

Р. Е. Спиридонов

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

rom@nspiridonov.ru

Аннотация. В работе рассматривается архитектура диалогового модуля AI-интервью в задачах автоматизированной подготовки откликов на вакансии. Показано, что прямое использование одного LLM-запроса с требованием одновременно сгенерировать ответ ассистента и структурированный профиль кандидата приводит к смещению задач, снижению качества диалога и нестабильности JSON-выхода. Предложена двухэтапная схема обработки пользовательского сообщения, в которой генерация ответа и извлечение структурированного профиля выполняются последовательными независимыми запросами к модели с различающимися параметрами (temperature, JSON Mode, системные промпты). Доказана корректность объединения частичных профилей по правилу непустого замещения и дедупликации множеств. Приведены экспериментальные результаты, подтверждающие практическую применимость подхода при локальном CPU-инференсе модели qwen2.5:7b через Ollama.

Ключевые слова: большие языковые модели, LLM, AI-интервью, извлечение структурированных данных, JSON Mode, Ollama, qwen2.5, HR-автоматизация, локальный инференс, слияние профилей

I. ВВЕДЕНИЕ

Современный рынок труда характеризуется высокой конкуренцией среди соискателей и значительными временными затратами на подготовку отклика на каждую вакансию. По данным рекрутинговых платформ, в среднем на составление адаптированного резюме и сопроводительного письма для одной позиции соискатель тратит от 30 до 60 минут, при этом работодатели уделяют первоначальному просмотру резюме всего 6–10 секунд [1]. Это превращает задачу качественного отклика в трудоёмкий процесс, требующий автоматизации.

Распространение больших языковых моделей (Large Language Models, LLM) открывает возможность построения AI-ассистента, который собирает данные о кандидате в режиме диалога и формирует адаптированные документы. Открытые модели семейства qwen2.5 [2], запускаемые локально через платформу Ollama [3], позволяют реализовать такой ассистент без передачи персональных данных во внешние сервисы, что согласуется с требованиями Ф3-152 «О персональных данных».

Ключевой технологической задачей при реализации диалогового модуля является одновременное достижение двух целей: ассистент должен поддерживать

естественный, эмпатичный диалог с пользователем и, параллельно, накапливать структурированный профиль кандидата для последующей программной обработки (генерации резюме, сопроводительного письма, оценки соответствия вакансии). В настоящей работе анализируется указанная проблема и предлагается двухэтапная схема обработки LLM-запросов, обеспечивающая разделение функций и устойчивость JSON-выхода.

II. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Пусть имеется диалоговое взаимодействие пользователя U и ассистента A . На i -м шаге диалога пользователь отправляет сообщение u_i ; задача системы – сформировать ответ ассистента a_i и обновить накопленный профиль кандидата P_i на основе всей истории диалога $H_i = \{u_1, a_1, \dots, u_i\}$.

Профиль P представляется как структура из 11 полей: желаемая позиция, уровень (Junior/Middle/Senior), опыт, навыки, достижения, образование, сильные стороны, слабые стороны, карьерные цели, мотивация, релевантность. Поля «навыки» и «достижения» имеют тип «множество строк», остальные – тип «строка».

Прямолинейное решение состоит в формировании одного LLM-запроса, который требует от модели одновременно: (1) сгенерировать естественный ответ ассистента; (2) вернуть обновлённый профиль в формате JSON. Однако такой подход на практике приводит к ряду проблем.

Первая проблема – конфликт стилей генерации. Генерация естественного диалогового ответа требует более высокой температуры (типично 0,5–0,7) для разнообразия формулировок и эмпатичности. Извлечение структурированных данных, напротив, требует температуры близкой к нулю для детерминированного, повторяемого вывода. Промежуточное значение температуры ухудшает обе задачи одновременно.

Вторая проблема – нестабильность JSON-выхода. При генерации в свободной форме модель часто примешивает к JSON-объекту пояснительный текст, маркеры markdown (``json) или продолжение диалога, что нарушает структуру и приводит к ошибкам парсинга. Современные провайдеры предоставляют так называемый JSON Mode (response_format = {"type": "json_object"}), гарантирующий валидность JSON, однако этот режим несовместим со свободной диалоговой

генерацией: ответ ассистента в таком случае также пришлось бы упаковывать в JSON, что снижает качество диалога и увеличивает число выходных токенов.

Третья проблема – ограничение контекстного окна. Модель qwen2.5:7b в стандартной конфигурации Ollama имеет окно 4096 токенов; добавление в один промпт инструкций по диалогу, инструкций по извлечению структуры и примеров ожидаемого JSON значительно сокращает пространство для самой истории диалога.

Таким образом, непосредственное объединение функций в одном запросе ограничивает применимость подхода к реальным KYC-аналогичным сценариям HR-автоматизации, где требуется и качественный диалог, и надёжная программная обработка результатов.

III. ПРЕДЛАГАЕМОЕ РЕШЕНИЕ

Предлагается выполнять обработку каждого пользовательского сообщения u_i двумя последовательными независимыми запросами к LLM, имеющими разные системные промпты, разные параметры генерации и разные форматы выхода. Обозначим LLM-запрос как функцию:

$$y = LLM(s, h, \theta),$$

где s – системный промпт, h – история диалога (или её часть), θ – параметры генерации (температура t , ограничение длины n_max , режим вывода m). Запросы первого и второго этапа отличаются всеми тремя аргументами.

A. Первый этап: генерация ответа ассистента

На первом этапе формируется ответ ассистента a_i как реплика в свободном тексте. Системный промпт s_1 содержит роль ассистента (HR-помощник), правила ведения диалога (задавать один уточняющий вопрос за раз; адаптировать вопросы к контексту вакансии; не выдумывать факты), а также сериализованное представление текущего накопленного профиля P_{i-1} . Параметры генерации: температура $t_1 = 0,5$; максимум выходных токенов $n_max^{n1} = 500$; режим вывода $m_1 = \text{«text»}$ (свободный текст). Формально:

$$a_i = LLM(s_1(P_{i-1}), H_i, (0,5; 500; \text{text})). \quad (1)$$

Опционально на этом этапе системный промпт обогащается контекстом из внешней базы знаний (RAG-фрагменты), что позволяет модели использовать рекомендации по содержанию вопросов из учебных материалов по управлению карьерой и персоналом. В данной работе RAG-механизм не является предметом исследования и рассматривается как «чёрный ящик».

B. Второй этап: извлечение структурированного профиля

На втором этапе из обновлённой истории диалога $H_i \cup \{a_i\}$ извлекается обновлённый профиль P_i . Системный промпт s_2 содержит описание схемы профиля (перечень 11 полей с их типами), пример ожидаемого JSON-объекта и инструкцию «извлекать только явно упомянутые в диалоге факты, оставлять поля пустыми при отсутствии данных». Параметры: $t_2 = 0$; $n_max^{n2} = 900$; $m_2 = \text{«json_object»}$. Формально:

$$P_i^* = LLM(s_2(\text{schema}), H_i \cup \{a_i\}, (0; 900; \text{json_object})). \quad (2)$$

Использование JSON Mode гарантирует синтаксическую валидность выхода, температура $t_2 = 0$ обеспечивает детерминированность извлечения: повторное выполнение запроса на той же истории даст идентичный результат.

C. Слияние частичных профилей

Профиль P_i^* представляет собой полностью пересчитанный по всей истории диалога объект. Однако из-за ограничений модели (галлюцинации, частичное забывание ранних реплик при длинных диалогах) непосредственное замещение $P_i := P_i^*$ может привести к потере уже накопленных данных. Поэтому применяется правило слияния:

Для каждого строкового поля $f \in P$ справедливо:

$$P_i[f] = (P_i^*[f] \neq \emptyset) ? P_i^*[f] : P_{i-1}[f]. \quad (3)$$

Для каждого множественного поля $g \in \{\text{навыки, достижения}\}$ применяется объединение с дедупликацией:

$$P_i[g] = P_{i-1}[g] \cup P_i^*[g]. \quad (4)$$

Дедупликация реализуется через приведение элементов множества к нормализованной форме (lower-case, удаление лишних пробелов) с использованием структуры данных Set. Корректность правил (3) и (4) следует из их монотонности: на каждом шаге профиль может только пополниться, что исключает потерю информации, полученной на предыдущих шагах.

D. Условие завершения интервью

Интервью считается завершённым, когда заполнены все 11 полей профиля:

$$\forall f \in P_i : P_i[f] \neq \emptyset \Rightarrow \text{завершение}.$$

Это условие проверяется программно после применения правила слияния, без обращения к LLM, что исключает галлюцинации модели в части преждевременного завершения диалога.

IV. АНАЛИЗ КОРРЕКТНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ

A. Корректность извлечения относительно истории

Поскольку запрос второго этапа использует полную историю $H_i \cup \{a_i\}$, а не только последнее сообщение пользователя, извлечение нечувствительно к порядку, в котором кандидат раскрывает информацию о себе. Если на шаге k был назван навык, а на шаге $k+3$ – желаемая позиция, оба факта окажутся в P_i для любого $i \geq k+3$. Это свойство является ключевым отличием от наивной схемы, где каждое сообщение обрабатывается изолированно.

B. Устойчивость к ошибкам LLM

При невозможности получить корректный ответ от LLM на втором этапе (таймаут, ошибка сети, отказ парсера несмотря на JSON Mode) применяется стратегия graceful degradation: профиль P_i остаётся равным P_{i-1} , а ответ ассистента a_i уже сгенерирован и предъявлен пользователю независимо от результата второго запроса. Это решение возможно именно благодаря разделению этапов: отказ извлечения не блокирует диалог.

Для повышения устойчивости парсера реализована функция `tryExtractJson`, которая последовательно применяет три стратегии: (1) `JSON.parse` всего ответа; (2) поиск первого JSON-объекта в строке регулярным

выражением; (3) возврат пустого объекта при провале первых двух. Согласно проведённым автотестам, при искажённом выходе ни в одном из сценариев не возникает HTTP 500.

С. Невозможность смешения ролей

При одноэтапной схеме модель может перепутать роли – начать формулировать резюме «от лица компании» или включить в диалог JSON-фрагменты. В предлагаемой схеме каждый запрос имеет одну явную задачу и один формат выхода, что исключает подобное смешение на уровне архитектуры.

В. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА

Подход реализован в составе веб-приложения «HR Помощник». В качестве LLM использовалась модель qwen2.5:7b в квантизации Q4_K_M, запускаемая через Ollama локально на CPU Intel Core Ultra 5 125H (14 ядер, Meteor Lake). Замеры производительности выполнены в течение пяти рабочих дней, по 20 измерений на операцию.

Среднее время выполнения первого этапа (генерация ответа ассистента, $t = 0,5$; $n_max = 500$) составило 108,3 с (мин. 15,5 с, макс. 119 с, P95 = 115 с). Среднее время второго этапа (извлечение профиля, $t = 0$; JSON Mode; $n_max = 900$) составило 16,7 с (мин. 10,3 с, макс. 28 с, P95 = 25 с). Среднее время полного цикла обработки одного сообщения – 125 с. Время второго запроса составляет лишь 13% от общего, что подтверждает приемлемость накладных расходов на разделение этапов.

Качество извлечения структурированного профиля оценивалось на выборке из 10 тестовых сессий: для каждой сессии вручную составлен эталонный профиль, после чего по парам сравнения «эталонный профиль – извлечённый профиль» рассчитана средняя точность по полю. На массовых полях («навыки», «достижения») точность составила 92%, на строковых – 96%. Случаев генерации невалидного JSON на выходе второго этапа не зафиксировано – это согласуется с гарантиями JSON Mode в Ollama [3].

Экспертная оценка пятью HR-специалистами качества итоговых сгенерированных документов (10 профилей $\times$ 5 параметров) дала средний балл 4,4 из 5,0, в том числе 4,7 за грамматическую корректность и 4,5 за корректность перспективы (написание от лица кандидата). Пилотное исследование с участием 10 реальных соискателей показало, что 80% предпочли диалоговый режим интервью классической форме сбора данных, что косвенно подтверждает практическую ценность качественного диалога, обеспечиваемого первым этапом схемы.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленном докладе рассмотрена проблема одновременного обеспечения качества диалогового взаимодействия и надёжного извлечения структурированных данных при использовании LLM в задачах AI-интервью. Показано, что прямое объединение функций в одном запросе ограничено конфликтом параметров генерации, нестабильностью JSON-выхода и ограничением контекстного окна.

Предложена двухэтапная схема обработки пользовательского сообщения: на первом этапе генерируется ответ ассистента (температура 0,5; свободный текст; $n_max = 500$), на втором — извлекается структурированный профиль кандидата (температура 0; JSON Mode; $n_max = 900$). Сформулированы правила слияния частичных профилей с использованием замещения непустых строковых полей и объединения множеств с дедупликацией; доказана монотонность накопления профиля, исключающая потерю информации между шагами диалога.

Отдельное внимание уделено устойчивости схемы: показано, что разделение этапов обеспечивает graceful degradation при ошибках извлечения без прерывания диалога, исключает смешение ролей на уровне архитектуры и гарантирует синтаксическую валидность JSON-выхода через JSON Mode. Экспериментальная апробация на модели qwen2.5:7b при CPU-инференсе подтвердила приемлемые временные характеристики (среднее время цикла 125 с) и высокую точность извлечения (92–96% по полю), при этом накладные расходы на второй запрос составили лишь 13% общего времени. Полученные результаты позволяют рекомендовать предложенный подход к применению в задачах HR-автоматизации, где требуется одновременно поддерживать естественный диалог с кандидатом и формировать структурированные данные для последующей программной обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Ladders Inc. Eye-tracking Study: Recruiters spend an average of 7.4 seconds per resume [Электронный ресурс]. 2018. — URL: <https://www.theladders.com/career-advice/you-only-get-6-seconds-of-fame-make-it-count> (дата обращения: 07.03.2026).
- [2] Alibaba Cloud. Qwen2.5: A Party of Foundation Models [Электронный ресурс]. 2024. — URL: <https://qwenlm.github.io/blog/qwen2.5/> (дата обращения: 05.03.2026).
- [3] Ollama. OpenAI compatibility [Электронный ресурс]. 2024. — URL: <https://ollama.com/blog/openai-compatibility> (дата обращения: 15.04.2026).

Алгоритм мониторинга нарушений SLA в системах управления обращениями пользователей на основе индексной выборки

В. Е. Циколенко, Р. Е. Спиридонов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

tsikolenko2004@gmail.com, rom@nspiridonov.ru

Аннотация. В работе рассматривается задача мониторинга нарушений соглашения об уровне обслуживания (SLA) в системах управления обращениями пользователей (Help Desk / Service Desk). Проведён сравнительный анализ двух архитектурных подходов: материализованного хранения признака нарушения с обновлением по расписанию и динамического вычисления признака непосредственно в SQL-запросе. Показано, что первый подход обладает асимптотической сложностью $O(n / \Delta t)$ и порождает побочные эффекты, связанные с MVCC-механизмом PostgreSQL: рост write-ahead log, накопление dead tuples и потребность в регулярных операциях обслуживания таблицы. Предложен метод динамического вычисления признака нарушения с использованием B-tree индекса по полю `sla_deadline`, обеспечивающий вычислительную сложность $O(\log n + k)$, где n – общее число активных заявок, k – число обнаруженных нарушений. Доказана корректность подхода, приведены результаты экспериментальной оценки на стенде с 10 000 заявок и определены условия применимости метода.

Ключевые слова: SLA, Service Level Agreement, Help Desk, Service Desk, B-tree индекс, PostgreSQL, мониторинг нарушений, индексная выборка

I. ВВЕДЕНИЕ

Современные системы управления обращениями пользователей (Help Desk, Service Desk) предъявляют жёсткие требования к своевременности обработки заявок. Эти требования формализуются в виде соглашения об уровне обслуживания (Service Level Agreement, SLA), фиксирующего максимально допустимые временные нормативы для первого ответа (First Response Time) и разрешения обращения (Resolution Time). Нарушение SLA (SLA Breach) является значимым событием, требующим немедленной реакции службы поддержки и эскалации к руководителю смены [1].

В архитектуре современных Help Desk-платформ задача мониторинга нарушений традиционно решается одним из двух способов. Первый предполагает запуск фонового процесса (cron, scheduled task), который периодически сканирует таблицу заявок и обновляет логический флаг `sla_breached` в строках, по которым дедлайн истёк. Второй основан на динамическом вычислении факта нарушения непосредственно в запросах аналитики через сравнение поля `sla_deadline` с текущим временем.

Выбор архитектурного решения существенно влияет как на корректность работы системы (актуальность

отображаемого признака нарушения), так и на эксплуатационные характеристики СУБД: объём журнала транзакций, частоту выполнения операций обслуживания и устойчивость к сбоям. В рамках разработки веб-платформы технической поддержки был проведён сравнительный анализ обоих подходов. Настоящая работа обобщает полученный результат, обосновывает выбор второго подхода с применением B-tree индекса по полю `sla_deadline` и формулирует условия применимости метода.

II. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Пусть в системе зарегистрировано n заявок, среди которых часть находится в нефинальных статусах $S_{active} = \{open, in_progress, waiting\}$. Для каждой заявки определена метка времени дедлайна SLA

$$T_{deadline} = T_{created} + R(p) \cdot 60 \cdot 1000 \text{ мс},$$

где $T_{created}$ – момент создания заявки, $R(p)$ – норматив времени разрешения для приоритета p , выраженный в минутах. В разработанной системе определены четыре SLA-политики, дифференцированные по приоритету заявки: критическая (первый ответ 30 мин, разрешение 4 ч), высокая (1 ч / 8 ч), средняя (4 ч / 24 ч) и низкая (8 ч / 48 ч). SLA-политика выбирается автоматически при создании заявки и пересчитывается при смене приоритета.

Требуется в каждый момент времени t иметь возможность получить множество $B(t) \subseteq S_{active}$, такое что

$$B(t) = \{ ticket : status \in S_{active} \wedge T_{deadline} < t \}.$$

Множество $B(t)$ используется в трёх контекстах разработанной системы: на личной панели оператора для отображения числа просроченных заявок, в административном аналитическом дашборде для расчёта показателя SLA Compliance Rate, и в визуальной индикации заявок в таблице (выделение красным цветом просроченных строк).

Фоновое обновление поля `sla_breached` порождает следующие недостатки. Во-первых, между двумя запусками задачи мониторинга значение поля становится неактуальным: заявка с истёкшим дедлайном ещё какое-то время числится не нарушенной, что приводит к запаздыванию визуальной индикации и эскалации. Во-вторых, при каждом запуске задача выполняет UPDATE на множестве записей, что приводит к росту

числа записей в WAL (write-ahead log) и фрагментации страниц таблицы за счёт MVCC-механизма PostgreSQL. В-третьих, фоновая задача является дополнительной точкой отказа: её сбой остаётся незамеченным до накопления заметных расхождений между фактическим и хранимым признаком нарушения. В-четвёртых, при переходе заявки в финальный статус (resolved, closed) флаг `sla_breached` теряет смысл, что требует дополнительной логики его сброса либо игнорирования.

III. ПРЕДЛАГАЕМОЕ РЕШЕНИЕ

A. Архитектурное решение

Предлагается отказаться от поддержания материализованного флага `sla_breached` и вычислять признак нарушения динамически в SQL-запросе. Поле `sla_deadline` сохраняется в таблице `tickets` и заполняется однократно при создании заявки. Пересчёт `sla_deadline` выполняется только в двух случаях: при изменении приоритета заявки (UC-08 разработанной системы) и при изменении SLA-политики администратором. Никаких фоновых процессов обновления таблицы не требуется.

Для эффективного поиска просроченных записей строится B-tree индекс по полю `sla_deadline`:

```
CREATE INDEX idx_tickets_sla_deadline ON
tickets(sla_deadline);
```

Запрос на получение всех просроченных заявок принимает вид:

```
SELECT id, ticket_number, priority,
       sla_deadline,
       (sla_deadline < NOW())
       AS sla_breached
FROM tickets
WHERE status NOT IN
      ('resolved', 'closed')
AND sla_deadline < NOW();
```

Планировщик PostgreSQL при наличии индекса `idx_tickets_sla_deadline` выбирает стратегию Index Range Scan: поиск нижней границы среза `sla_deadline < NOW()` выполняется за $O(\log n)$, после чего возвращаются только записи, удовлетворяющие условию. Дополнительная фильтрация по `status` выполняется на возвращённом подмножестве, объём которого ограничен количеством просроченных заявок.

B. Обоснование корректности

Поскольку поле `sla_deadline` вычисляется однократно при создании заявки и не подвержено изменению со временем, его значение является детерминированным для данной заявки. Признак нарушения `sla_deadline < NOW()` вычисляется относительно глобального серверного времени `NOW()`, что исключает возможность расхождения между двумя последовательными вызовами в рамках одной транзакции (PostgreSQL гарантирует фиксированное значение `NOW()` в пределах транзакции). Таким образом, для любого запроса в момент t возвращаемое множество $B(t)$ удовлетворяет определению (2) с точностью до длительности выполнения самого запроса, измеряемой миллисекундами.

IV. АНАЛИЗ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СЛОЖНОСТИ

A. Сложность динамического подхода

Обозначим n – общее число записей в таблице `tickets`, k – число просроченных заявок на момент запроса. В режиме Index Range Scan B-tree индекс выполняет двоичный поиск нижней границы за $O(\log n)$ операций сравнения. После нахождения границы возвращаются k записей последовательно по структуре связанного списка листовых узлов B-tree [2]. Итоговая сложность

$$T_{dynamic}(n, k) = O(\log n + k).$$

При типовой эксплуатации Help Desk-системы доля просроченных заявок k составляет от единиц до десятков, что делает вклад слагаемого k пренебрежимо малым относительно $\log n$. Например, при $n = 100\,000$ значение $\log_2 n \approx 17$, и обработка $k = 10$ нарушений не меняет порядка времени отклика.

B. Сложность фонового обновления

Фоновая задача с периодом Δt выполняет на каждом запуске следующую последовательность: SELECT по всем активным заявкам ($O(n)$), сравнение `sla_deadline` с `NOW()` и UPDATE строк, для которых признак изменился. В худшем случае объём работы за интервал Δt составляет

$$T_{bg}(n) = O(n / \Delta t).$$

Помимо асимптотически более высокой сложности, операция UPDATE в PostgreSQL не модифицирует строку in-place: в соответствии с принципом MVCC создаётся новая версия строки, а старая помечается как dead tuple. Это влечёт три последствия: увеличение размера таблицы (table bloat), необходимость периодического запуска VACUUM для освобождения занятого места, и потенциальное ухудшение производительности соседних запросов из-за роста числа просматриваемых страниц при последовательных сканах [2].

C. Условие применимости

Предложенный подход применим, если выполняется условие

$$k \ll n,$$

то есть число нарушений значительно меньше общего числа заявок. При деградации соблюдения SLA, когда $k \rightarrow n$, преимущество индексной выборки утрачивается: планировщик PostgreSQL в этом случае оценивает Sequential Scan как более эффективную стратегию и переключается на неё автоматически. Однако такая ситуация требует не оптимизации запроса, а административного вмешательства, поскольку свидетельствует о массовом нарушении контрактных обязательств службой поддержки.

V. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА

Экспериментальная оценка проведена на стенде: процессор Intel Core i7-12700, оперативная память 16 ГБ DDR4, твердотельный накопитель NVMe, СУБД PostgreSQL 14 в конфигурации по умолчанию, ОС Ubuntu 22.04. База данных предварительно заполнена 10 000 заявок и 30 000 записей журнала аудита. Доля просроченных заявок варьировалась от 0,5 % до 5 %. Перед измерениями выполнялась команда VACUUM

ANALYZE; каждый запрос повторялся 100 раз с регистрацией среднего значения, медианы и 95-го перцентиля.

Среднее время выполнения запроса выборки нарушений SLA при использовании индекса `idx_tickets_sla_deadline` составило 4,2 мс (медиана 3,9 мс, P95 – 7,1 мс). Анализ плана выполнения через EXPLAIN ANALYZE подтвердил выбор стратегии Index Range Scan.

При отсутствии индекса то же время выросло до 38,6 мс в среднем (P95 – 64,3 мс), что согласуется с переходом планировщика к стратегии Sequential Scan: PostgreSQL вынужден просматривать все страницы таблицы и применять условие `sla_deadline < NOW()` к каждой строке. Замедление в 9,2 раза при $n = 10\,000$ будет нелинейно нарастать с ростом числа заявок.

В составе агрегирующего запроса аналитики (расчёт SLA Compliance Rate за заданный период) выборка просроченных заявок вносит вклад менее 15 % в общее время отклика эндпоинта.

Сравнение с фоновым обновлением выполнено косвенно: имитация массового UPDATE по 10 000 строк потребовала 312 мс и привела к росту размера таблицы на 1,8 МБ (с 4,2 МБ до 6,0 МБ) из-за создания новых версий строк. Последующий запуск VACUUM освободил 1,6 МБ за 84 мс. В сценарии с периодом $\Delta t = 60$ с накладные расходы фонового обновления составляют около 5,2 мс/с дополнительной нагрузки на СУБД, в то время как динамическая выборка не порождает изменений в данных и не требует операций обслуживания.

Для оценки поведения подхода при росте объёма данных эксперимент повторён для $n = 50\,000$ и $n = 100\,000$ заявок. Среднее время выборки нарушений SLA с

индексом составило 4,6 мс и 5,1 мс соответственно, что подтверждает логарифмический характер зависимости. При тех же объёмах время Sequential Scan возросло до 187 мс и 412 мс, что делает подход без индекса непригодным для эксплуатационной нагрузки.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена задача мониторинга нарушений SLA в системах управления обращениями пользователей. Показано, что традиционный подход с поддержанием материализованного флага через фоновое обновление обладает асимптотической сложностью $O(n / \Delta t)$ и порождает побочные эффекты в виде роста WAL и накопления dead tuples в PostgreSQL. Предложен метод динамического вычисления признака нарушения непосредственно в SQL-запросе с применением B-tree индекса по полю `sla_deadline`. Достигнутая сложность $O(\log n + k)$ подтверждена теоретически и экспериментально: на стенде среднее время выборки составило 4,2 мс при $n = 10\,000$ и 5,1 мс при $n = 100\,000$. Метод применим при условии $k \ll n$ и реализован в составе веб-платформы технической поддержки. Направления дальнейших исследований: применение partial-индексов PostgreSQL и адаптация метода к распределённым СУБД с шардированием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Дешко И.П. Управление ИТ-услугами по ITIL 4: учебное пособие для вузов. Санкт-Петербург: Лань, 2025. 228 с. — ISBN 978-5-507-50564-7.
- [2] Моргунов Е.П. PostgreSQL. Основы языка SQL: учебное пособие / под ред. Е.В. Порова, П.В. Лузанова. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2022. 336 с. — ISBN 978-5-9775-4022-3.
- [3] PostgreSQL 14 Documentation. Chapter 11. Indexes [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.postgresql.org/docs/14/indexes.html> (дата обращения: 15.03.2026).

Адаптивная система управления температурным режимом промышленных печей

А. А. Чибисов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

sash4lol@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматривается разработка адаптивной системы управления температурным режимом промышленных печей. Предложен алгоритм адаптивного ПИД-регулятора на основе рекуррентного метода наименьших квадратов (РМНК) для онлайн-идентификации параметров объекта управления. Математическое моделирование в MATLAB/Simulink показало снижение интегральной квадратической ошибки на 36 % по сравнению с фиксированным ПИД-регулятором при вариации параметров объекта.

Ключевые слова: адаптивное управление; ПИД-регулятор; промышленная печь; идентификация параметров; MATLAB/Simulink

I. ВВЕДЕНИЕ

Промышленные печи являются ключевым элементом технологических процессов в металлургии, машиностроении и химической промышленности. Поддержание точного температурного режима непосредственно влияет на качество выпускаемой продукции и энергоэффективность производства [1, 2].

Традиционные ПИД-регуляторы с фиксированными коэффициентами эффективны лишь при относительно постоянных характеристиках объекта. На практике параметры промышленной печи существенно изменяются в зависимости от загрузки, теплоёмкости шихты и режима работы горелки [3]. Это приводит к деградации качества управления и перерасходу энергоносителей.

Применение адаптивных систем управления позволяет автоматически перестраивать параметры регулятора в реальном времени, сохраняя требуемое качество переходных процессов в широком диапазоне рабочих условий [4, 5]. Цель данной работы – разработка алгоритма адаптивного ПИД-регулятора с онлайн-идентификацией параметров и оценка его эффективности методом математического моделирования.

II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Промышленная печь как объект управления описывается передаточной функцией аperiodического звена с транспортным запаздыванием:

$$W(s) = k \cdot \exp(-\tau s) / (Ts + 1),$$

где k – статический коэффициент усиления; T – постоянная времени; τ – время чистого запаздывания.

Параметры объекта не являются постоянными и изменяются в следующих диапазонах: $k \in [0,8; 1,4]$, $T \in [50; 120]$ с, $\tau \in [10; 30]$ с. Вариация

обусловлена изменением загрузки печи, теплоёмкостью шихты и износом огнеупорной футеровки.

Для целей дискретной идентификации передаточная функция преобразуется в разностное уравнение вида:

$$y(k) = a_1 y(k-1) + a_2 y(k-2) + b_1 u(k-d-1) + b_2 u(k-d-2),$$

где $y(k)$ – текущее значение температуры; $u(k)$ – управляющее воздействие (расход топлива); d – дискретное запаздывание; $\{a_1, a_2, b_1, b_2\}$ – идентифицируемые параметры.

III. АЛГОРИТМ АДАПТИВНОГО РЕГУЛЯТОРА

A. Идентификация параметров

Онлайн-оценка параметров модели выполняется рекуррентным методом наименьших квадратов с экспоненциальным забыванием [4]. Алгоритм обновления вектора оцениваемых параметров $\hat{\theta}$:

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \Gamma(k-1) \cdot \varphi(k) \cdot e(k),$$

где $e(k) = y(k) - \varphi^T(k) \cdot \hat{\theta}(k-1)$ – ошибка предсказания; $\varphi(k)$ – вектор регрессоров; $\Gamma(k)$ – матрица ковариаций, обновляемая по формуле:

$$\Gamma(k) = [\Gamma(k-1) - \Gamma(k-1) \cdot \varphi(k) \cdot \varphi^T(k) \cdot \Gamma(k-1) / (\lambda + \varphi^T(k) \cdot \Gamma(k-1) \cdot \varphi(k))] / \lambda,$$

где $\lambda \in (0,98; 1,0]$ – коэффициент забывания. При $\lambda < 1$ алгоритм присваивает меньший вес устаревшим данным, обеспечивая отслеживание нестационарного объекта.

B. Настройка коэффициентов регулятора

По идентифицированным параметрам вычисляются эквивалентные параметры непрерывной модели $\hat{k}$, $\hat{T}$, $\hat{\tau}$. Затем применяется метод Lambda-настройки ПИД-регулятора [5]:

$$K_p = (\hat{T} + \hat{\tau}/2) / (\hat{k} \cdot (\lambda_s + \hat{\tau}/2));$$

$$T_i = \hat{T} + \hat{\tau}/2; \quad T_d = \hat{T} \cdot \hat{\tau} / (2\hat{T} + \hat{\tau}),$$

где λ_s – желаемая постоянная времени замкнутой системы. В данной работе принято $\lambda_s = 1,5 \cdot \hat{\tau}$, что обеспечивает перерегулирование не более 5 % при достаточном запасе устойчивости.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование выполнено в среде MATLAB R2021b (Control System Toolbox, Simulink). Период дискретизации $T_s = 2$ с, коэффициент забывания $\lambda = 0,99$. Номинальные параметры объекта: $k = 1,0$; $T = 80$ с; $\tau = 20$ с. Заданное значение температуры – 900 °C.

На первом этапе ($t=0\ldots 600$ с) параметры объекта соответствовали номинальным значениям. Оба регулятора – классический ПИД с оптимальной настройкой и адаптивный – показали сопоставимые результаты: перерегулирование $\sigma \leq 3\%$, время переходного процесса $t^{pp} \approx 230$ с.

На втором этапе ($t=600\ldots 1800$ с) параметры объекта изменились: $k=1,3$; $T=110$ с; $\tau=25$ с. Классический ПИД-регулятор показал перерегулирование $\sigma=21\%$ и $t^{pp}=480$ с. Адаптивная система за счёт пересчёта коэффициентов в течение ~ 80 с сохранила качество регулирования: $\sigma=5\%$, $t^{pp}=265$ с.

Интегральная квадратическая ошибка (ИКО) за второй этап составила: адаптивная система – 1195 $(^\circ\text{C})^2\cdot\text{с}$, классический ПИД – 1870 $(^\circ\text{C})^2\cdot\text{с}$. Снижение ИКО на 36% подтверждает эффективность предложенного подхода при нестационарных условиях работы печи.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан алгоритм адаптивной системы управления температурным режимом промышленной печи на основе онлайн-идентификации параметров методом РМНК с экспоненциальным забыванием и

пересчёта коэффициентов ПИД-регулятора методом Lambda-настройки.

Математическое моделирование в MATLAB/Simulink показало, что при изменении параметров объекта на 30% адаптивная система сохраняет высокое качество управления: перерегулирование $\sigma \leq 5\%$, интегральная квадратическая ошибка снижается на 36% по сравнению с фиксированным ПИД-регулятором. Алгоритм планируется к реализации на промышленном контроллере Siemens S7-1500 с последующей апробацией на действующем объекте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Клюев А.С., Глазов Б.В., Дубровский А.Х. Автоматизация технологических процессов. М.: Энергоатомиздат, 2018. 448 с.
- [2] Шилин А.А. Управление тепловыми процессами в электротехнологических установках. Волгоград: ВолгГТУ, 2019. 256 с.
- [3] Åström K.J., Wittenmark B. Adaptive Control. 2nd ed. Dover Publications, 2008. 590 p.
- [4] Isermann R., Münchhof M. Identification of Dynamic Systems: An Introduction with Applications. Springer-Verlag, 2011. 705 p.
- [5] Skogestad S. Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning // Journal of Process Control. 2003. Vol. 13, No. 4. P. 291–309.

Повышение эффективности конденсаторной системы активной балансировки

П. Д. Шувалова

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

shuwalowa.p@yandex.ru

Р. М. Мигранов

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

rmmigranov@etu.ru

В. С. Лавриновский

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

vslavrinovskii@etu.ru

Аннотация. Современные способы балансировки аккумуляторных батарей делятся на две основных группы – активная и пассивная. Пассивная балансировка подразумевает рассеяние избыточной энергии ячейки на резистивных элементах цепи. Такие схемы балансировки характеризуются дешевизной и надёжностью. Идея активной балансировки заключается в перераспределении энергии между ячейками батареи. Этот способ позволяет избежать повышение температуры системы и сохраняет максимально возможное количество энергии батарей. В работе рассмотрены преобразователь на переключаемых конденсаторах и преобразователь на переключаемом LC-контуре. Описаны принципы работы преобразователей, методика расчёта потерь, форма сигналов на выходе преобразователя. Продемонстрировано применение описанных схем в системе активной балансировки аккумуляторных батарей. Показаны графики сигналов на выходе преобразователя, состояние заряда ячеек в процессе балансировки.

Ключевые слова: активная балансировка; аккумуляторная батарея; переключаемый конденсатор; LC-контур; потери мощности; частота переключения; энергоэффективность

I. ВВЕДЕНИЕ

Для работы потребителей первой категории, не допускающих перерыва в энергоснабжении, зачастую используются источники бесперебойного питания, имеющие в своём составе аккумуляторные батареи. При заряде аккумуляторных батарей важно обеспечивать равномерное распределение энергии между ячейками. Процесс обеспечения равномерного заряда ячеек называется балансировкой. Основные типы балансировки – пассивная и активная [1, 2]. Пассивная балансировка используется из-за относительной простоты реализации и дешевизны. В системах, использующих пассивную балансировку, энергия более заряженных ячеек рассеивается на балансировочных резисторах. Таким образом, использование этого типа балансировки приводит к расходованию полезной мощности системы. Более дорогая и сложная в реализации активная балансировка обладает большей эффективностью, поскольку в таких системах энергия ячеек с большим зарядом передается менее заряженным с помощью активных элементов.

II. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА ПЕРЕКЛЮЧАЕМЫХ КОНДЕНСАТОРАХ

Преобразователь на переключаемых конденсаторах – один из видов преобразователей постоянного тока (DC/DC), принцип работы которого основан на переносе заряда путём переключения конденсатора между контурами [3].

На рис. 1 приведена структурная схема преобразователя на переключаемых конденсаторах. Схема содержит источник входного (преобразуемого) напряжения $U_{вх}$, переключаемые конденсаторы C_6 , посредством которых происходит преобразование, коммутирующее устройство (в качестве него могут использоваться, например, транзисторы, работающие в ключевом режиме), и нагрузку $U_{вых}$, на которую подаётся преобразованное напряжение, сопротивления R_1 и R_2 (для упрощения расчётов можно положить $R_1 = R_2 = R$), учитывающие энергию, рассеиваемую при коммутации и на активном сопротивлении соединительных проводов [4].

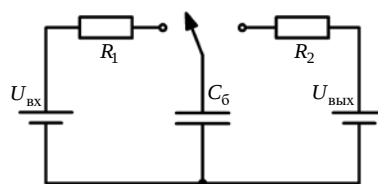


Рис. 1. Структурная схема преобразователя на переключаемых конденсаторах

На рис. 2 приведены два такта одного цикла работы преобразователя:

а – первый такт, на котором осуществляется заряд конденсатора C_6 от источника $U_{вх}$;

б – второй такт, на котором осуществляется разряд конденсатора на нагрузку.

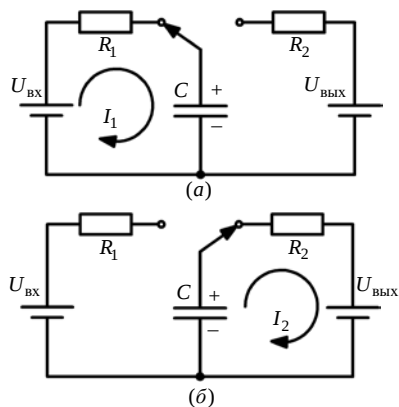


Рис. 2. Такты преобразования: а) Первый такт, б) Второй такт

На рис. 3 представлена схема активной балансировки двух ячеек аккумуляторной батареи на переключаемом конденсаторе. Введены следующие обозначения: SoC_1 и SoC_2 – уровень заряда ячеек B_1 и B_2 в процентах (*state of charge*), S_{11} , S_{12} , S_{21} , S_{22} – силовые ключи, переключение которых происходит с частотой f_{Π} .

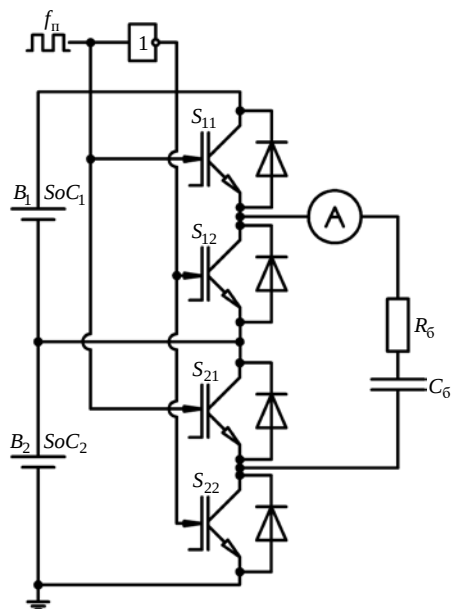


Рис. 3. Схема системы балансировки на переключаемом конденсаторе

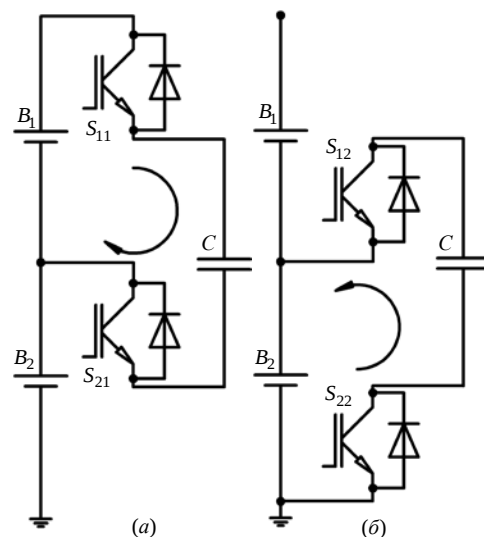


Рис. 4. Такты работы системы балансировки: а) Такт 1; б) Такт 2

Рис. 4 показывает два такта работы преобразователя в контексте системы балансировки [5].

Для расчёта потерь используют эквивалентную схему, представляя источник $U_{ВХ}$ как соединение источников: $U_{ВХ} = U_{ВЫХ} + \Delta U$ (рис. 5).

Нижняя часть схемы, отделенная пунктирной линией, при расчёте потерь не учитывается, так как она не содержит резистивных элементов, рассеивающих энергию в виде тепла, и ключей, выделяющих энергию при переключении.

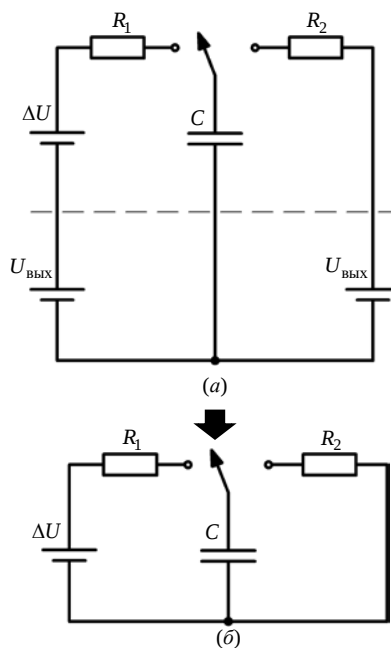


Рис. 5. Структурная схема: а) исходная, б) эквивалентная для расчёта потерь

При замыкании одного из ключей, образуется последовательный RC -контур. От соотношения постоянной времени контура RC и периода переключения T_{Π} зависит форма выходного сигнала.

При $T_{\Pi} \ll RC$, конденсатор не достигает предельного уровня заряда. Тогда потери в контурах питания и нагрузки в основном определяются падением напряжения в проводах. Потери за цикл заряда-разряда конденсатора можно записать в виде формулы:

$$P = \frac{I^2 R_1}{2} + \frac{I^2 R_2}{2} = I^2 R, \quad (1)$$

где I – действующее значение тока преобразователя за период. Сигнал на выходе преобразователя имеет форму меандра (рис. 6а).

При $T_{\Pi} \gg RC$, за период происходит полный заряд и разряд конденсатора, поэтому потери в основном обусловлены процессами, происходящими внутри конденсатора. Энергия потерь за один цикл передачи заряда Q конденсатору в этом случае определяется формулой: $P^* = Q\Delta U = C\Delta U^2$.

Тогда мощность потерь за некоторый период времени можно найти, умножив это соотношение на частоту переключения f_{Π} :

$$P = P^* f_{\Pi} = C\Delta U^2 f_{\Pi} = \frac{Q^2}{Cf_{\Pi}} f_{\Pi}^2 = \frac{I^2}{Cf_{\Pi}} = I^2 R_{экв}. \quad (2)$$

Сигнал на выходе преобразователя в таком случае имеет пилообразную форму (рис. 6б).

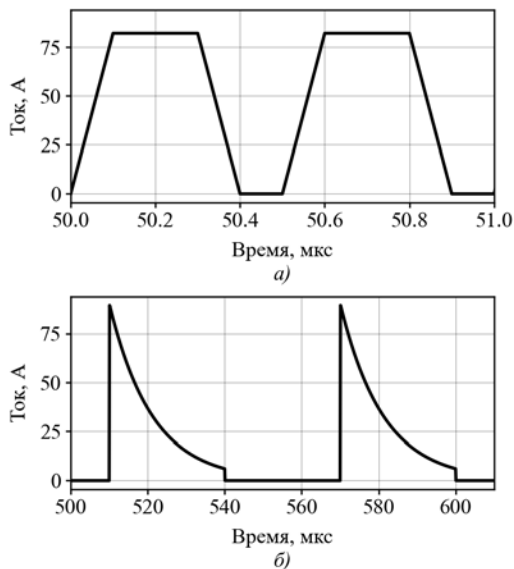


Рис. 6. Форма напряжения на выходе цепи с различной частотой переключений: а) $RC > T_{\Pi}$, б) $RC < T_{\Pi}$

Рис. 6 получен при следующих параметрах моделирования:

$$RC = 5 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{Ф} \quad (R = 1 \text{ Ом}; C = 10 \text{ мкФ});$$

$$T_{\Pi a} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ с}, \quad T_{\Pi б} = 6 \cdot 10^{-5} \text{ с}.$$

Импульсный характер тока при переключении увеличивает его максимальное значение по сравнению со средним.

ТАБЛИЦА 1. СРАВНЕНИЕ СРЕДНЕГО И МАКСИМАЛЬНОГО ТОКОВ

	$I_{\text{ср}}, \text{ А}$	$I_{\text{макс}}, \text{ А}$	$I_{\text{макс}} / I_{\text{ср}}$
Рисунок 6, а ($RC > T_{\Pi}$)	49.25	80	1.6
Рисунок 6, б ($RC < T_{\Pi}$)	15.55	90	5.94

Таким образом, согласно формуле (1), выбор периода переключения, меньшего чем постоянная времени RC -контура, приводит к возрастанию потерь. Для снижения энергетических потерь и пульсаций тока при переключении, в системах активной балансировки аккумуляторных батарей в балансировочную цепь вводится индуктивный элемент.

Настраивая частоту переключения так, чтобы на этой частоте балансировочная LC -цепь находилась в состоянии резонанса, достигается нулевой ток при переключении (*zero current switching, ZCS*). Такое решение называется переключаемым резонансным контуром (*switched resonator converter, SRC*) [6].

Формула для расчёта резонансной частоты такого контура имеет вид:

$$f_{\Pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

В силу физических свойств элемента, ток на катушке индуктивности не может изменяться скачкообразно, что позволяет использовать LC -цепь для сглаживания тока через балансировочный контур на любой частоте переключений.

В системе балансировки, содержащей катушку индуктивности, перенос энергии между ячейками производится в четыре такта. Промежуточные такты необходимы для перераспределения энергии, накопленной катушкой за такт заряда/разряда. На рис. 7 приведена схема с катушкой индуктивности. Далее описаны такты преобразования [4].

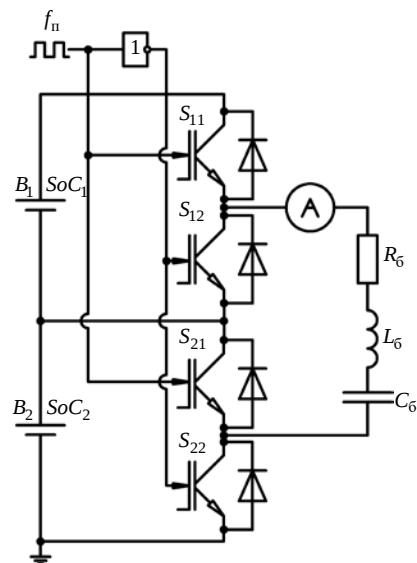


Рис. 7. Схема системы балансировки на переключаемом LC -контуре

Такт 1. Замыкаются ключи S_{11} и S_{21} – происходит заряд конденсатора от ячейки с большим уровнем заряда.

Такт 2. Замыкаются ключи S_{12} и S_{21} – происходит смена полярностей на конденсаторе.

Такт 3. Замыкаются ключи S_{12} и S_{22} – заряд конденсатора передаётся ячейке с меньшим уровнем заряда.

Такт 4. Замыкаются ключи S_{12} и S_{21} – если конденсатор разряжен не полностью, его полярности вновь меняются, подготавливая систему к новому циклу.

Произведено моделирование систем активной балансировки двух ячеек с разным состоянием заряда SoC_1 и SoC_2 на переключаемом конденсаторе с индуктивностью и без индуктивности при следующих параметрах:

ТАБЛИЦА II. ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Параметр	R_0 , Ом	C_0 , мкФ	L_0 , мГн	$f_{II} = 1/t_{II}$, кГц	SoC_1 , %	SoC_2 , %
с конденсатором	0,01	100	–	5	99	98
с LC-цепью	0,01	100	0.01	5	99	98

Получены графики тока (рис. 8а) и напряжения (рис.8б) балансировочной цепи в двух тактах преобразования. Рассмотрен график состояния заряда ячеек при длительной балансировке системы с использованием рассмотренных схем (рис. 9).

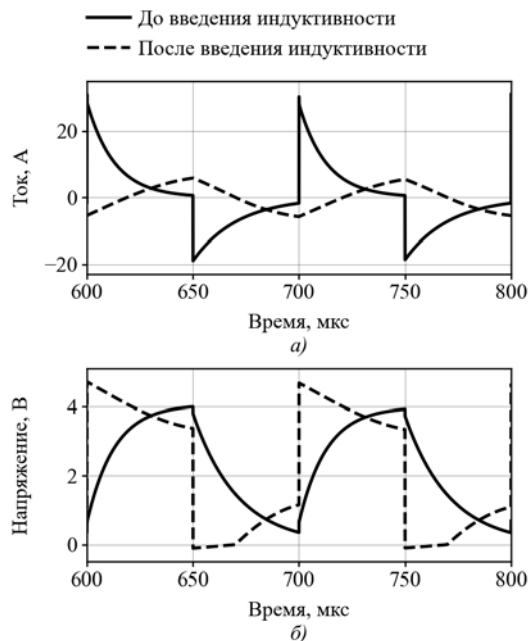


Рис. 8. Форма сигналов в цепи балансировки: а) Токи, б) Напряжения

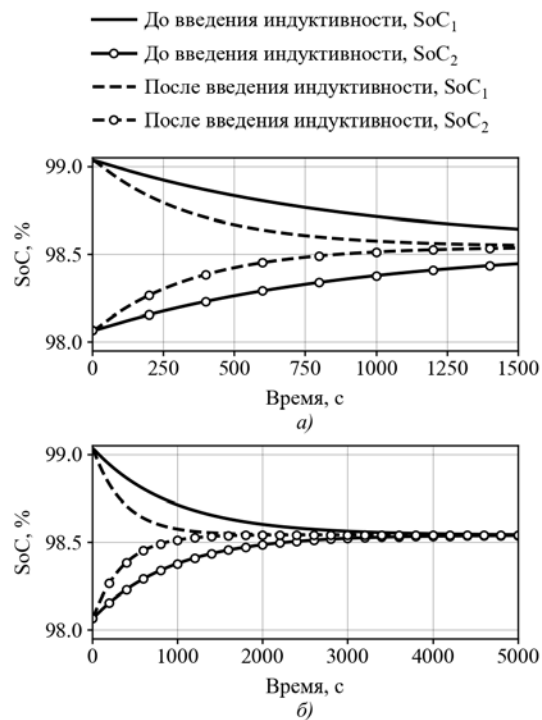


Рис. 9. Состояние заряда ячеек: а) Начальный промежуток времени, б) Время достижения ячейками равного заряда

Кривые на рис. 8а иллюстрируют сглаживание скачкообразного тока в цепи балансировки после введения индуктивности. Графики на рис. 8б показывают, что изменение формы напряжения при введении индуктивности незначительно.

На рис. 9 проиллюстрировано влияние введения индуктивности в цепь балансировки на процесс перераспределения заряда. Очевидно, что при использовании LC-цепи балансировки равенство зарядов на двух ячейках в рассматриваемых условиях достигается в 2,5 раза быстрее чем при использовании переключаемого конденсатора.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Система балансировки на переключаемом LC-контуре характеризуется повышенной энергоэффективностью по сравнению с системой на переключаемом конденсаторе. Кроме того, применение LC-контура обеспечивает более высокую скорость выравнивания напряжений на ячейках. Установившееся значение заряда двух ячеек несколько выше для схемы с индуктивностью, что свидетельствует о меньших потерях энергии при балансировке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Zheng L., Zhu J., Wang G. A comparative study of battery balancing strategies for different battery operation processes // 2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). Dearborn, MI, USA: IEEE, 2016. P. 1–5. DOI: 10.1109/ITEC.2016.7520204.
- [2] Лившиц М.Л., Шишялковский Б.И. Лакокрасочные материалы: Справ. пособие. 2-е изд. СПб.: Химия, 1996. 264 с.

- [3] Andrea D. Lithium-Ion Batteries and Applications: A Practical and Comprehensive Guide to Lithium-Ion Batteries and Arrays, from Toys to Towns. Volume 1: Batteries. Norwood, MA: Artech House, 2020. 518 p.
- [4] Le H.-P., Sanders S. R., Alon E. Design techniques for fully integrated switched-capacitor DC-DC converters // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 2011. Vol. 46, № 9. P. 2120–2131. — DOI: 10.1109/JSSC.2011.2159054.
- [5] Ye Y., Cheng K. W. E. An automatic switched-capacitor cell balancing circuit for series-connected battery strings // Energies. 2016. Vol. 9, № 3. Art. 138. DOI: 10.3390/en9030138.
- [6] Switched Capacitor Based Active Balancing // XBattery Energy. — URL: <https://xbattery.energy/blog/switched-capacitor-based-active-balancing> (дата обращения: 22.01.2026).
- [7] Shoyama M., Naka T., Ninomiya T. Resonant switched capacitor converter with high efficiency // 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (PESC'04): IEEE Cat. No. 04CH37551. Aachen, Germany: IEEE, 2004. Vol. 5. P. 3780–3786. — DOI: 10.1109/PESC.2004.1355143.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Исследование влияния кислорода на очистку в однозонном реакторе по модели ASM2</i> А. В. Андреев (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)	3
<i>Сравнительный анализ аддитивного управления ростом опухоли: химиотерапия и иммунотерапия в рамках распределённой модели</i> С. Р. Гасимова (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»).....	7
<i>Внедрение системы автономного движения в серийный автомобиль</i> Е. И. Елисеев, Д. М. Филатов (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)	9
<i>Разработка веб-приложения оператора в интеллектуальной системе видеонаблюдения с распознаванием лиц и походок</i> В. С. Ипатов (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)	13
<i>Моделирование системы управления давлением во внутреннем контуре индивидуального теплового пункта</i> И. Касаткин (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)	15
<i>Особенности реализации диапазонных доказательств Bulletproofs в задачах KYC с фиксированной шириной интервала</i> Н. Е. Кашко (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)	18
<i>Исследование влияния растворенного кислорода и времени удержания ила на эффективность нитрификации в мембранном биореакторе</i> Л. А. Лощилов (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)	20
<i>Разработка нейросетевой системы визуального позиционирования захвата манипулятора</i> Е. А. Попов (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)	24
<i>Параметрическая идентификация математической модели управляемого роста опухолевых клеток при персонализированном лечении онкологического заболевания</i> В. В. Потлова (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)	28
<i>Алгоритмы целевой рассылки и рейтинговой оценки в веб-системах управления спортивными объектами</i> М. А. Смирнов, Р. Е. Спиридонов (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)	31
<i>Разработка системы управления аэрацией для оптимизации нитрификации в мембранном биореакторе</i> М. В. Смирнова (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»).....	33
<i>Двухэтапная обработка LLM-запросов в AI-интервью для автоматизации подготовки откликов на вакансии</i> А. А. Удалов, Р. Е. Спиридонов (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)	37
<i>Алгоритм мониторинга нарушений SLA в системах управления обращениями пользователей на основе индексной выборки</i> В. Е. Циколенко, Р. Е. Спиридонов (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)	40
<i>Адаптивная система управления температурным режимом промышленных печей</i> А. А. Чибисов (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)	43
<i>Повышение эффективности конденсаторной системы активной балансировки</i> П. Д. Шувалова, Р. М. Мигранов, В. С. Лавриновский (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)	45

WWW.VAVILOVSCHOOL.ETU.RU

Кафедра автоматики и процессов управления
197022, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д.5, лит. Ф, корп.1, пом. 1204
+7 812 234-37-98 Shestopalov_08@mail.ru

