

Таким образом, токовое управление двигателем постоянного тока с использованием ПД-регулятора позволяет обеспечить требуемое качество переходного процесса и реализовать алгоритм компенсации изменения момента инерции.

Следует отметить, что полученные результаты могут быть распространены и на приводы на основе трехфазного асинхронного электродвигателя при работе в определенном режиме. Если скорость задающего сигнала на отработку углового перемещения ограничена таким образом, что работа двигателя осуществляется на линейном участке механической характеристики [2], то фактически привод описывается уравнениями аналогичными (1), (2)

$$\dot{\alpha} = k_p \omega, \quad (18)$$

$$J_{\text{лп}} \cdot \dot{\omega} = M - M_C, \quad (19)$$

Момент двигателя M при этом линейно зависит от скорости вращения. Это позволяет реализовать на основе ПД-регулятора такое же управление, как и в приводе постоянного тока.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Оптимизация позиционного привода постоянного тока. О.Н. Прокопеня, Л. И. Вабищевич, О. Г. Прожижко, А. С. Лапука // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2024. – № 2. – С. 79–83.
2. Применимость линейной модели трехфазного асинхронного электродвигателя для проектирования мехатронных модулей. О. Н. Прокопеня, А. В. Францевич, И. В. Угляница // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2025. – № 2. – С. 78–85.

УДК681.5; 639.3.06

ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ФАКТОРОВ ВЛИЯЮЩИХ НА СХЕМУ АВТОМАТИЗАЦИИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ УСТАНОВОК ЗАМКНУТОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Шикунец А.Б.¹, Козырь А.В.¹, Штепа В.Н.², Жерносеков Д.Д.³

1) Полесский государственный университет;

г. Пинск, Республика Беларусь

2) Белорусский государственный технологический университет;

г. Минск, Республика Беларусь

3) Витебский государственный университет имени П.М. Машерова;

г. Витебск, Республика Беларусь

Введение. Рыбоводная установка замкнутого водоснабжения (УЗВ) является сложной агробιοтехнологической системой, совмещающей в себе технические агрегаты и биологические процессы. Технология подразумевает многократное повторное использование воды, которая в процессе выращивания и кормления насыщается большим количеством метаболитов. Их аккумулярование приводит к снижению темпов массонакопления или гибели рыбы. Для решения проблемы используются системы биологической фильтрации, что позволяет производить преобразование азотистых соединений путем нитрификации, снижая токсичность

метаболитов. Это возможно благодаря колониям микроорганизмов, которые адсорбируются на элементах биологической загрузки [1].

Основная часть. Эффективность работы такой системы определяется рядом факторов, таких как температура оборотных вод, показатель концентрации растворенного кислорода, освещенность, pH, количество азотистых соединений [2]. К ним можно отнести также интенсивность барботажа и концентрацию взвешенных веществ. Эффект негативного воздействия параметров на функциональные качества представлен в виде диаграммы Исикавы (рис. 1).



Рисунок 1 – Причинно-следственная диаграмма Исикавы описывающая негативное влияние многоуровневой иерархии факторов на процесс биофильтрации в УЗВ

Соответственно, для стабильной работы биофильтра требуется постоянный контроль и корректировка технологических режимов. Во время эксплуатации промышленных рыбоводных систем существует технологическая возможность управления следующими показателями:

- pH – путем дозирования в систему реагентов (щелочи/кислоты);
- концентрация растворенного кислорода и активность барботажа – изменяя производительность системы нагнетания воздуха и диаметра пузырьков;
- концентрация взвешенных веществ – вследствие уменьшения диаметров фильтрующего полотна, либо увеличения количества фильтроциклов системы механической очистки, также повышение данного показателя может служить сигналом к контролю корректности ее работы.

При этом, управление такими показателями, как температура, количество азотистых соединений, а также качественный и количественный состав микроорганизмов биофильтра невозможно в силу технологических особенностей оборудования.

Для определения количественных значений показателей причинно-следственных связей была разработана лабораторная модель биофильтра, выполнявшая мониторинг процессов биологической очистки воды в УЗВ (рис. 2). В каждой из емкостей организована аэрация при помощи поршневых компрессоров BOYU производительностью 110 л/мин. Также в систему обеспечена подача раствора нашатырного спирта из резервуаров объемом 20 л, расположенных над биофильтром. Он дозировался в эквиваленте 2,0 г аммиака в сутки, что соответствовало

производительности биоагрузки Hel-X с полезной площадью 644 м²/м³. Для переработки заданного объема азотистых соединений в каждую емкость-реактор помещено 15 литров вышеуказанного субстрата.



Рисунок 2 – Лабораторная модель системы биологической фильтрации

Модельная установка оснащена автоматизированной измерительной системой, способной посредством погружных датчиков фиксировать pH, окислительно-восстановительный потенциал (ОВП), количество растворенных солей (TDS) и температуру.

Одним из основных показателей, влияющих на эффективность биологической фильтрации, является pH водного раствора (см. рис. 1), который регистрировался в течении 30 дней в разное время суток, усредненные данные для этого периода представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Изменение водородного показателя в системе в течении дня

Время	pH
18:00	8,12±0,06
21:00	8,05±0,12
0:00	7,81±0,09
3:00	7,21±0,14
6:00	7,02±0,12
9:00	6,83±0,16
12:00	6,21±0,11
15:00	5,91±0,17

Ежедневно в 18:00 в установке производилась pH-коррекция путем внесения раствора NaOH, доводя значения pH до 8,1, что является приемлемыми условиями для работы бактерий обеих фаз нитрификации.

Как видно из результатов измерений, без pH-коррекции имеет место снижение водородного показателя в течении суток по мере поступления аммиака в систему, что в условиях УЗВ может повлечь за собой нежелательные последствия как в работе биофильтра, так и системы в целом. Снижение водородного показателя более чем на 0,5 ед. в сутки оказывают негативное воздействие на гидробионтов [3]. Аналогичная ситуация зафиксирована и с другими перечисленными выше параметрами. Недостаток кислорода, как и избыток взвешенных частиц, негативно влияет на скорость конверсии аммиака/аммония, а также на выращиваемых в системе рыб.

Соответственно существует необходимость разработки и внедрения решений автоматизации, способных отслеживать и корректировать в реальном времени

факторы, которые обоснованы причинно-следственной диаграммой Исикавы (см. рис. 1). Схема управляющих воздействий при работе такой системы представлена на рисунке 3.



Рисунок 3 – Предлагаемая схема управляющих воздействий при автоматизации биофильтра в УЗВ

Такой подход (см. рис. 3) предполагает собой контроль и корректировку параметров среды, которые возможно регулировать в биофильтре. Так при изменении значений водородного показателя ниже, или выше значений, необходимых для нормальной жизнедеятельности, как микробного сообщества, так и выращиваемых гидробионтов, будет активироваться рН-корректор [4]. При этом возможна реализация, как реагентного, так и безреагентного способа регуляции кислотности, основанного на использовании электротехнологических модулей [5].

По аналогии, при фиксации повышения количества взвешенных частиц посредством измерительного модуля, должна подаваться команда к проверке корректности работы системы механической фильтрации оператором, а также к изменению диаметра фильтрующих полотен. При фиксации датчиками растворенного кислорода значений, не соответствующих целевым, система произведет корректировку работы нагнетательного оборудования.

В режиме реального времени существует возможность отслеживать температуру, однако в данном случае ее корректировка под нужды бактерий нитрификаторов нереализуема в производственных условиях, так как данный показатель всегда в первую очередь устанавливается для комфортного культивирования выращиваемых гидробионтов.

Заключение. В ходе исследования (мониторинга) изменения водородного показателя в течении суток было выявлено, что при отсутствии постоянного

контроля и корректировки данный параметр значительно изменяется, подтверждая высокую актуальность разработки систем автоматизации технологических процессов биофильтрации. В промышленных условиях оперативно можно контролировать pH, концентрацию растворенного кислорода и количество взвешенных частиц. Предложенная схема может позволить автоматически управлять данными факторами, что потенциально повысит эффективность работы биофильтра и ресурсоэффективность УЗВ, исходя из определённых на этапе системного анализа причинно-следственных связей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Bartelme R.P., McLellan S.L., Newton R.J. Freshwater Recirculating Aquaculture System Operations Drive Biofilter Bacterial Community Shifts around a Stable Nitrifying Consortium of Ammonia-Oxidizing Archaea and Comammox Nitrospira // *Frontiers in Microbiology*. – 2017. – Vol. 8. – P. 101. DOI: 10.3389/fmicb.2017.00101
2. Козырь А.В. Определение факторов, влияющих на систему биологической фильтрации в индустриальной аквакультуре, и методы повышения ее эффективности // *Вопросы рыбного хозяйства Беларуси*. – 2022. – Вып. 38. – С. 167–182.
3. Козырь А.В. Рыбоводно-технологическая оценка установок замкнутого водоснабжения и пути повышения их ресурсоэффективности // *Веснік Палескага дзяржаўнага ўніверсітэта. Серыя прыродазнаўчых навук*. – 2022. – № 1. – С. 55–65.
4. Пономарёв, С. В. Индустриальное рыбоводство: учеб. / С. В. Пономарёв, Ю. Н. Грозеску, А. А. Бахарева. – Изд. 2-е. исп. и доп. – СПб: Лань, 2013. – 416 с.
5. Схема и описание работы аквапонной системы с комбинацией биологических и АОРs способов очистки воды / В.Н. Штепа [и др.] // *Актуальные проблемы и тенденции развития науки, образования и производства в условиях цифровизации экономики : материалы Международной научно-практической конференции, Минск, 7 октября 2022 г.: сборник докладов / Республиканский институт профессионального образования; под общ. ред. В.Н. Голубовского. - Минск : РИПО, 2022. - С. 92-94.*

УДК 621.311;621.396.94;004.9;681.5;004.4;528.8

АВТОМАТИЗАЦИЯ ОЦЕНКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ВКЛАДА ГЕЛИОСТАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ НА БОЛЬШОЙ СОЛНЕЧНОЙ ПЕЧИ В УЗБЕКИСТАНЕ

**Шерматов Ж.З.¹, Акбаров Р.Ю.¹, Тахиров Ш.², Зафарова К.Ж.³,
Лазарев М.А.⁴, К.В. Хрулев⁵**

1) Институт материаловедения Академии наук Республики Узбекистан;
г. Ташкент, Узбекистан

2) Dept. of Civil and Environ. Engineering, University of California;
Berkeley, USA

3) Специализированная школа №5 в Паркентском районе;
г. Ташкент, Узбекистан

4) ГБОУ Школа №57;
г. Москва, Российская Федерация

5) Школа «Летово»,
г. Москва, Российская Федерация

Большая Солнечная Печь (БСП) оснащена современными приборами для измерения плотности концентрированной солнечной энергии, температуры исследуемых материалов и приборами для контроля протекания высокотемпера-