

АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ ТА РОЗРОБКА СТРУКТУРИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ АКВАПОНІКОЮ

Р. В. Залозний, аспірант

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: blackblackgreycy@ gmail.com

Анотація. Проведений аналіз розподілу задач керування в аквапонній системі та представлено тривірневу систему управління аквапонними системами, яка поєднує автоматичні, автоматизовані та ручні процеси для забезпечення її ефективної та адаптивної роботи. На основі математичної моделі аквапонної системи проведено аналіз основних алгоритмів керування: періодичного включення/виключення, широтно-імпульсної модуляції (ШИМ) та П-регулятора. Розглянуто їх переваги, недоліки та області застосування.

Із використанням математичної моделі аквапоніки створено структуру системи керування, що дало змогу провести моделювання та аналіз основних алгоритмів керування та на його основі розробити рекомендації для вибору алгоритму системи керування.

За результатами моделювання було встановлено, що жоден із розглянутих алгоритмів не забезпечує оптимальних технологічних параметрів, що вимагає в майбутньому розробки інтелектуальних алгоритмів керування аквапонікою, спрямованих на підвищення ефективності системи та якості кінцевої продукції.

Ключові слова: аквапоніка, система керування, алгоритми керування, моделювання

Актуальність. Аквапоніка – це нова високотехнологічна сільськогосподарська технологія, яка поєднує в собі як вирощування рослинної продукції, так і виробництво рибної продукції. Основною метою методу є органічне виробництво м'ясної та рослинної продукції для їжі людей.

В основі виробництва – використання природних процесів життєдіяльності прісноводних тварин (риб, креветок) як живильного середовища для рослин промислового виробництва. У ході процесу рослини споживають необхідні їм продукти виділень живих організмів – хімічні речовини (азотісті, калійні, фосфорні сполуки, вуглекислий газ та ін.), розчинені у воді, і, при цьому, природним шляхом очищають і збагачують її киснем.

У процесі виробництва виключається потреба у використанні різних хімічних добрив зі складною системою їх дозування та зберігання: процес хімізації, переробки та очищення відбувається природним шляхом та у замкнутому циклі. Таким чином, аквапоніка імітує природний вир у природі.

Виробництво їжі залежить від наявності ресурсів, таких як земля, прісна вода, викопна енергія та поживні речовини [2], а поточне споживання або деградація цих ресурсів перевищує їх глобальну швидкість [12]. Концепція планетних кордонів має на меті визначити межі навколишнього середовища, в межах яких людство може безпечно діяти в умовах дефіциту ресурсів [11].

Основним глобальним викликом є перехід економічної моделі, заснованої на зростанні, до збалансованої еколого-економічної парадигми, яка замінює нескінченне зростання сталим розвитком [5]. Для того, щоб підтримувати збалансовану парадигму необхідно забезпечити сталий розвиток основних концепцій, що поєднують інноваційність з продуктивністю.

У цьому контексті аквапоніка була ідентифікована як підхід до сільського господарства, який, за допомогою переробки поживних речовин і відходів може допомогти в досягненні цілей сталого розвитку, особливо для посушливих регіонів або території з неорними ґрунтами [3].

Аквапоніка також пропонується як рішення для використання територій в міських районах для виробництва продуктів харчування ближче до ринків [8]. Аквапоніка нині швидко розвивається у промислове виробництво, а впровадження сучасних систем керування дозволяють значно збільшити продуктивність і ефективність виробництва.

Традиційні одноконтурні системи аквапоніки включають як аквакультуру, так і гідропоніку, між якими відбувається рециркуляція води. У традиційних системах автоматизації при керуванні не враховується взаємозв'язок щодо технологічних параметрів обох підсистем, таких як рН, температура та концентрація поживних речовин тощо. Однак роз'єднання контурів систем керування аквапоніки для аквакультури та гідропоніки може зменшити потребу в компромісах шляхом розділення компонентів, таким чином дозволяючи технологічним умовам у кожній

підсистемі бути оптимізованими. Одна з ключових проблем у звичайних системах аквапоніки полягає в тому, що поживні речовини у стоках, які виробляє риба, відрізняються від оптимальних поживних речовин розчину для рослин.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Аквапоніка, як стійка технологія для виробництва їжі з низьким впливом на довкілля, пропонує альтернативу традиційним енергозатратним методам [13]. Ключову роль у цих системах відіграють мікробіоти, які забезпечують нітрифікацію та перетворення поживних речовин з відходів риб у доступні для рослин форми.

Глобальні екологічні, соціальні та економічні виклики вимагають інновацій у виробництві їжі, зокрема в контексті сталого розвитку. Контрольоване сільське господарство, зокрема аквапоніка, що поєднує рециркуляційні системи аквакультури та гідропоніку, пропонує потенційне рішення для проблем зміни клімату, втратою родючості ґрунту та дефіцитом ресурсів [6].

Існуючі праці з аквапоніки зосереджують увагу на ключових біохімічних процесах у воді. Зокрема, оскільки побічним продуктом життєдіяльності риби є аміак (NH_3), що є токсичним для риб. У біофільтрі здійснюється процес нітрифікації, у якому NH_3 перетворюється на NO_2 та NO_3 , що є поживою для рослин.

У [1] описано модель біофільтра та представлено ключові константи модулювання. Праця [10] демонструє поетапне перетворення NH_3 у NO_2 з подальшим перетворенням у NO_3 . Оскільки аквапонна система є симбіотичною тому ключові параметри, що впливають на рослини та риби є важливими і у процесі біофільтрації [14].

У системах аквапоніки, де важливими є взаємодії між водним середовищем, рослинами та рибами, моніторинг та контроль основних параметрів води є надзвичайно важливими для забезпечення стабільної та продуктивної роботи системи [15]. Оскільки біофільтр виконує важливу роль у перетворенні токсичних сполук (аміаку) в менш токсичні форми (нітрати), важливо налаштувати параметри води так, щоб це забезпечувало оптимальні умови для росту рослин і здоров'я риб [7].

У [3] детально розглянуто основні параметри аквапоніки, зокрема впливи та взаємозв'язки, що формуються в умовах симбіозу аквакультури, нітрифікуючих бактерій і рослин. Основні питання дослідження спрямовані на вирішення проблем і моделювання процесів у замкнених системах [9]. Дослідження моделювання з інтеграцією RAS для теляпії та NFT для томатів. Риба забезпечує 26 % потреб рослин в азоті. Керування параметрами води зменшує коливання нітратів на 35 %, сприяючи ефективності системи. Було виявлено дисбаланс (TSS для риб; натрій, кальцій, магній, амоній для рослин) і розроблено стратегію управління, щоб запобігти дисбалансу, зменшити потребу в добривах і підвищити ефективність води. Запропоновано алгоритм калібрування математичної моделі на основі множини приналежності та мозаїки Вороного. Він ефективний для обмеженого аналізу даних, оцінки упереджень через (гіпер) сфери. Модель пояснила 84 % мінливості росту риби та 75 % засвоюваності.

У контексті параметрів води для аквапонічної системи основними факторами, які визначають ефективність цієї системи, є рН, аміак (NH_3), нітрит (NO_2), нітрат (NO_3), кисень та температура води. Ці параметри є критично важливими для здоров'я як рослин, так і риб, а також для функціонування біофільтру, який є ключовим елементом аквапоніки [4]. Важливість розгляду питання математичного моделювання систем аквапоніки, в тому числі моделі акваріума як невід'ємної частини загальної системи, полягає в можливості подальшої реалізації змодельованих систем.

Крім вищеперахованого важливо відзначити також перспективи аквапонних систем у галузі фармацевтики. Лікарські рослини є ключовим ресурсом для виробництва фармацевтичних препаратів, але надмірний збір з природних запасів без належного відновлення загрожує зникненням багатьох видів. Отже, розвиток і поширення знань у сфері підвищення ефективності аквапонних систем сприяють співпраці між дослідниками, науковцями й промисловцями, стимулюючи їх подальший розвиток.

Об'єктом дослідження є процеси керування аквапонними системами, що впливають на якість кінцевої продукції.

Предметом дослідження є алгоритми керування аквапонними системами, що будуть використані в системі управління для моніторингу в реальному часі.

Мета дослідження – розроблення алгоритмів та структури системи керування і моніторингу аквапоніки в реальному часі та перевірка їх ефективності.

Матеріали та методи дослідження. Керування аквапонічною системою включає в себе кілька ключових аспектів, таких як моніторинг та регулювання параметрів води, рівнів поживних речовин, а також контролю за умовами для рослин і риби. Це може включати як автоматичне, так і ручне управління в залежності від технології та обладнання (рис. 1).

До автоматичних процесів керування належать:

- Циркуляція води, яка виконується автоматичним керуванням двигунами насосів для циркуляції води між резервуарами (рибний бак і бак з рослинами). Це важливо для забезпечення належного рівня аерації та фільтрації води. Сенсори рівня води можуть автоматично вмикати або вимикати насос для підтримки оптимального рівня води в кожному резервуарі.

- Температура води, яка регулюється термостатами або автоматичними системами нагріву/охолодження для підтримки постійної температури води. Наприклад, для риби (таких як тилapia) температура води повинна бути в межах 22-28 °C. Всі параметри температури можуть бути відслідковувані за допомогою сенсорів і автоматично коригуватися.

- Регулювання рівню кисню у воді, яке відбувається шляхом автоматичного керування аерацією води (наприклад, за допомогою компресорів або аераторів) для забезпечення достатнього рівня розчиненого кисню в воді. Сенсори рівня кисню можуть включати або вимикати аератори відповідно до вимог риби.

- Керування штучним освітленням, яке також можна автоматизувати увімкнення/вимкнення світла залежно від часу доби або потреб рослин.

- Моніторинг і контроль рН та хімічних показників, при якому автоматичні регулятори рН можуть регулювати рівень кислотності води за допомогою добавок або коригуючих агентів. Регулятори рівня амонію, нітратів та інших поживних речовин можуть автоматично регулювати додачу добрив або фільтрацію.

• Керування площею поверхні біофільтра, що також можна автоматизувати, використовуючи такі підходи: регулювання потоку води через біофільтр; використання змінних біофільтрів, регулювання типу біофільтраційного матеріалу. Це може бути частково автоматизовано через систему вивантаження або додачі матеріалу в біофільтр.

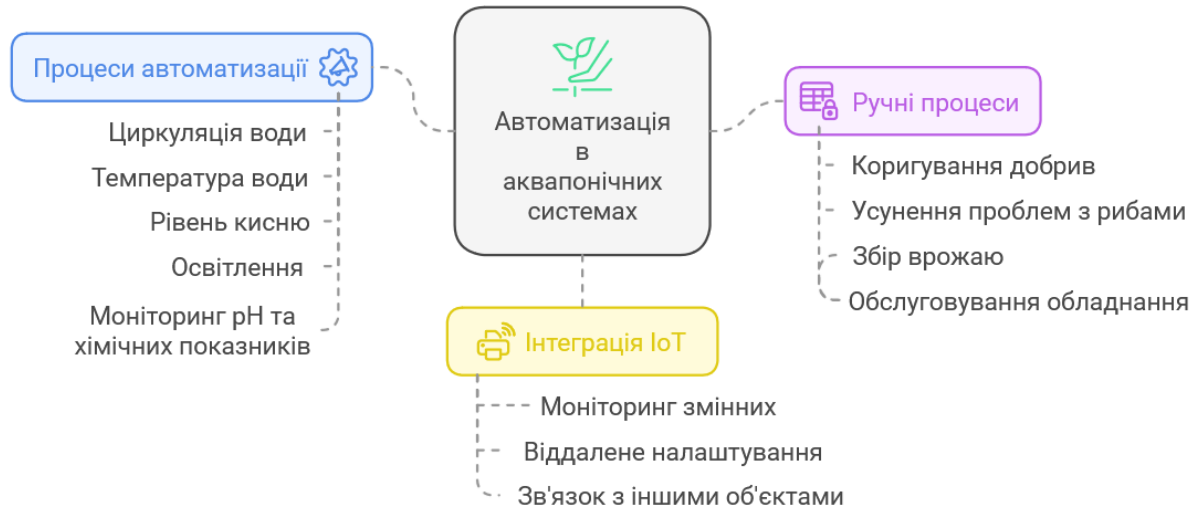


Рис. 1. Розподіл задач керування в аквапонній системі

Не всі з названих процесів підлягають автоматизації та, як правило, замінюються ручним управлінням:

• Коригування складу добрив: хоча можна автоматизувати основні процеси моніторингу поживних речовин, іноді доводиться вручну додавати або коригувати склади добрив у разі серйозних змін у потребах рослин або риб.

• Виявлення та усунення проблем з рибами, що виконується шляхом спостереження за станом риб та потребує людського втручання, особливо у разі хвороб або аномальних поведінкових реакцій. Це важливо для корекції умов середовища або лікування риб.

• Збір врожаю та риби, висадка рослин та заселення акваріуму рибою неможливо автоматизувати без спеціального робота чи механізму. Це також включає обробку та догляд за рослинами.

• Визначення стану та обслуговування технологічної апаратури та технічних засобів. Хоча більшість систем фільтрації можуть бути автоматизовані, періодична

перевірка та очищення фільтра, особливо у випадку забруднення або засмічення, може вимагати втручання людини.

У сучасних аквапонних системах для віддаленого моніторингу та керування часто використовуються системи Інтернету речей (IoT). Це дозволяє користувачу отримувати дані про температуру, рН, рівень кисню, вологість, світло тощо, через мобільні додатки або комп'ютери. Автоматичні системи можуть бути інтегровані в таку мережу для оптимізації та забезпечення ефективної роботи системи без потреби постійного контролю.

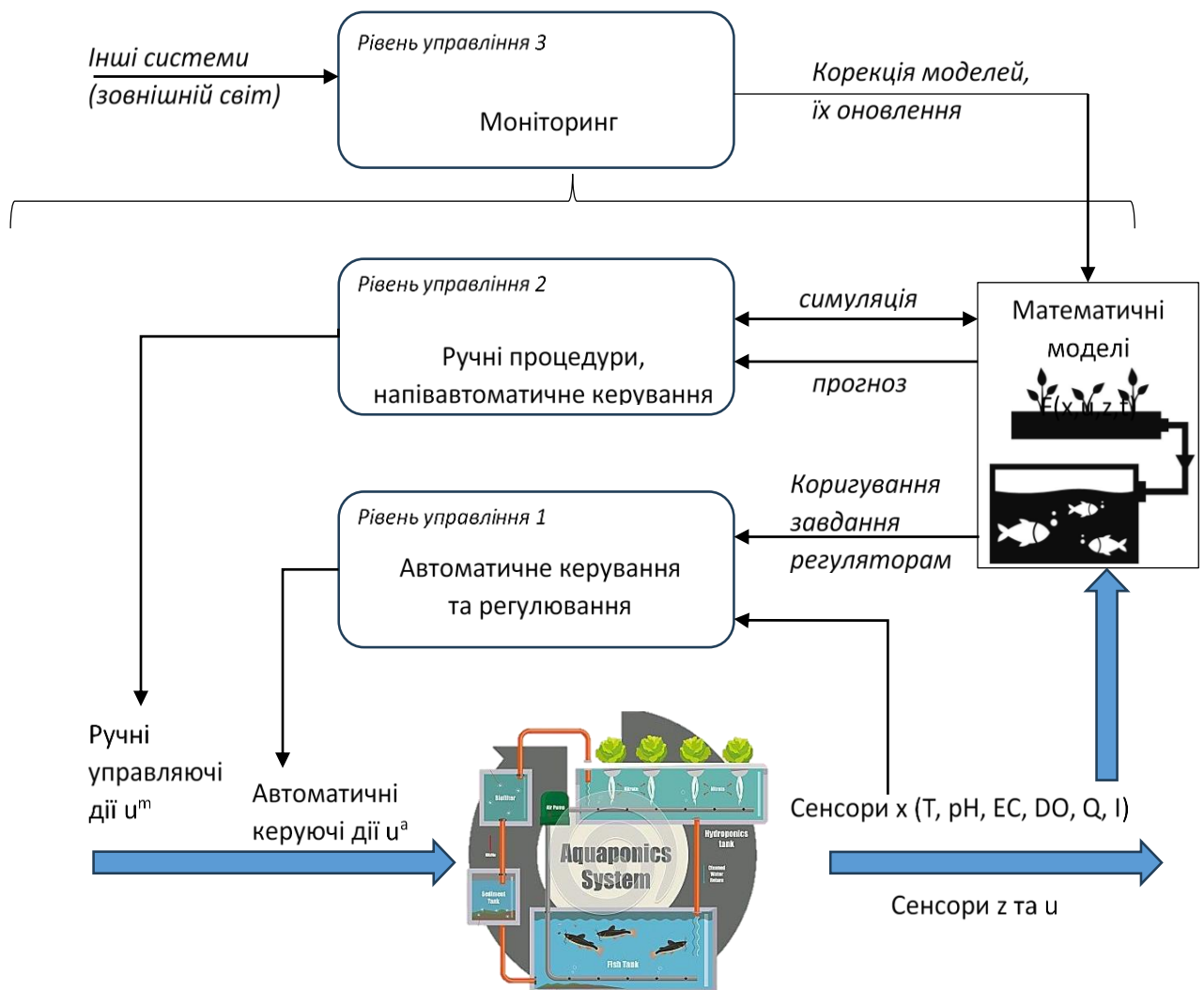


Рис. 2. Структура системи управління

Таким чином, в аквапонічній системі більшість параметрів, таких як циркуляція води, температура, рН та рівень кисню, можна автоматизувати, в той час як догляд за рослинами та рибами, коригування поживних речовин та деякі аспекти фільтрації

все ще потребують людського втручання. На основі цього висновку в роботі запропоновано трирівневу систему управління аквапонічною системою (рис. 2), що поєднує автоматичні, автоматизовані та ручні процеси для забезпечення ефективної та адаптивної роботи системи.

Перший рівень – автоматичне керування: на цьому рівні реалізовані всі основні функції, що потребують регулярного моніторингу та коригування без втручання людини (регулювання циркуляції води – автоматичне коригування потоку води через систему, що дозволяє забезпечити належну аерацію та фільтрацію, залежно від потреб риб та рослин; регулювання температури води: використання термостатів та систем нагрівання/охолодження для підтримки оптимальної температури води; моніторинг рівня кисню – автоматична активація або деактивація аераторів для забезпечення достатнього рівня розчиненого кисню в воді; керування освітленням – автоматичне вмикання та вимикання штучного освітлення в залежності від часу доби або потреб рослин; регулювання потоку води через біофільтр – автоматичне коригування потоку води для підтримки оптимальної площі поверхні біофільтра та ефективності фільтрації.

Другий рівень – ручне управління: цей рівень забезпечує можливість втручання оператора у разі необхідності, зокрема для: коригування складу добрив; очищення біофільтрів; моніторинг стану риб та рослин; збір врожаю; підбір і налаштування фільтраційного матеріалу; регулювання рівня рН і хімічних показників.

Третій рівень – інтелектуальне управління і моніторинг параметрів в аквапонній системі, що дозволяє здійснювати необхідні коригування системи в реальному часі та вчасно отримувати дані про ключові параметри системи.

Таким чином, запропонована трирівнева система управління дозволить забезпечити баланс між автоматизацією і гнучкістю, необхідною для керування аквапонною системою та забезпечення її високої продуктивності. Крім того, реалізація через ІоТ забезпечить доступність та віддалений моніторинг процесу.

Результати досліджень та їх обговорення. Для створення автоматизованої системи керування, моделювання та налаштування автоматичних регуляторів спочатку була створена її математична модель:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dQDO}{dt} &= k_{oxygen_air} \times (8 - QDO) - k_{respiration_fish} - k_{respiration_plants} + k_{oxygen_aerator} \\ \frac{dpH}{dt} &= k_{phrespiration} + k_{phplants} + k_{phEC} \times EC \\ \frac{dT_w}{dt} &= k_{temp_heater} \times Ua + k_{temp_air} \times (Ta - T_w) \\ \frac{dLevel}{dt} &= Qw - evap_rate \\ EC &= k_{ECTIN} \times [TIN] + k_{ECTIP} \times [TIP] \end{aligned} \right. \quad (1)$$

У таблиці 1 наведені пояснення до коефіцієнтів рівняння (1) та вказані їх значення.

1. Коефіцієнти моделі аквапонної системи

Коефіцієнт	Опис	Одиниці	Значення
k_{oxygen_air}	Коефіцієнт обміну кисню між повітрям і водою	г/л/день	0.02
$k_{respiration_fish}$	Коефіцієнт споживання кисню рибами	г/л/день/г	$0.0001 * W_fish$
$k_{respiration_plants}$	Коефіцієнт споживання кисню рослинами	г/л/день/г	$0.00001 * W_plants$
$k_{oxygen_aerator}$	Кисень від аерації	г/л/день	$0.05 * Paer$
k_{temp_heater}	Підвищення температури нагрівачем	°C/Вт	0.1
k_{temp_air}	Вплив температури повітря на воду	°C/°C	0.05
$k_{ph_respiration}$	Вплив дихання риб на рН	од рН/день/г	$-0.0001 * W_fish$
k_{ph_plants}	Вплив рослин на рН	од рН/день/г	$0.00005 * W_plants$
evap_rate	Швидкість випаровування води	см/день	0.05
k_{ECTIN}	Коефіцієнт впливу концентрації TIN на електропровідність	мСм/см на г/л	0.5
k_{ECTIP}	Коефіцієнт впливу концентрації TIP на електропровідність	мСм/см на г/л	(0.3-0.5)

Зміна концентрації кисню в воді залежить від кількох факторів: $8 - QDO$ – різниця між максимальною концентрацією кисню в воді та поточною концентрацією; k_{oxygen_air} – коефіцієнт обміну кисню між повітрям і водою (г/л/день); $k_{respiration_fish}$ – споживання кисню рибами (г/л/день/г риби); $k_{respiration_plants}$ – споживання кисню рослинами (г/л/день/г рослин); $k_{oxygen_aerator}$ – кількість кисню, який додається аератором (г/л/день).

Зміна рН води залежить від споживання кисню та поживних речовин рибами та рослинами: $k_{ph_respiration}$ – вплив дихання риб на рН (од рН/день/г риби); k_{ph_plants} – вплив рослин на рН (од рН/день/г рослин).

Температура води змінюється через вплив нагрівача та температури повітря: k_{temp_heater} – коефіцієнт, який описує, як потужність нагрівача змінює температуру води (°C/Вт); Ua – потужність нагрівача (Вт); k_{temp_air} – коефіцієнт, що описує вплив

температури повітря на температуру води ($^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}$); T_a – температура повітря ($^{\circ}\text{C}$); T_w – поточна температура води ($^{\circ}\text{C}$).

Зміна рівня води залежить від витрати води через насос і швидкості випаровування: Q_w – витрата води через насос (г/л/день); evap_rate – швидкість випаровування води (см/день).

Іони азоту (як амоніум NH_4^+ , нітрати NO_3^-) та фосфору (як фосфати PO_4^{3-}) є основними іонними сполуками, що впливають на електропровідність, та кожен з цих іонів має певну здатність проводити електричний струм, що визначається їхньою концентрацією у воді та валентністю. Тому, електропровідність води EC , (мСм/см) залежить від: $[\text{TIN}]$ – концентрація загального інорганічного азоту (г/л); $[\text{TIP}]$ – концентрація загального інорганічного фосфору (г/л); k_{ECTIN} – коефіцієнт впливу концентрації TIN на електропровідність (мСм/см на г/л); k_{ECTIP} – коефіцієнт впливу концентрації TIP на електропровідність (мСм/см на г/л). При моделюванні використовувались нормовані коефіцієнти.

Наведені параметри спочатку бралися з літератури для конкретних умов (температура води, об'єм води, рівень аерації тощо) або таблиць [1, 3, 4], а потім уточнювалися на експериментальній установці. Наприклад, коефіцієнт обміну кисню між повітрям і водою $k_{\text{oxygen_air}}$ визначається, зокрема, швидкістю дифузії кисню з повітря в воду. Для аквапонічних систем з малими потужностями аерації це значення може бути в межах 0.01 – 0.1 г/л/день. Було взято $k_{\text{oxygen_air}} = 0.03$ г/л/день. Далі проважився експеримент, протягом якого було виміряно середню концентрацію кисню в воді до і після аерації за певний час. Залежно від інтенсивності аерації цей коефіцієнт був уточнений.

Для кожної з керованих змінних (рівень води, температура води, концентрація кисню) можна використати пропорційний контролер (П-регулятор), де коефіцієнт K_p визначає чутливість системи до зміни значень. Керуючими змінними при цьому будуть: $Q_{w_{\text{ctrl}}}$ – регульована витрата води через насос (г/л/день); $U_{a_{\text{ctrl}}}$ – регульована потужність нагрівача (Вт); $P_{aer_{\text{ctrl}}}$ – регульована потужність аератора (Вт);

Таким чином отримуємо наступні формули:

$$\begin{cases} Ua_{ctrl} = Kp_{temp} \times (Tw_{target} - Tw) \\ Qw_{ctrl} = Kp_{level} \times (Level_{target} - Level) \times \frac{P_{pump}}{P_{max}} \\ Paer_{ctrl} = Kp_{oxygen} \times (QDO_{target} - QDO) \end{cases} \quad (2)$$

де $P_{max}=100$ — максимальна потужність насоса.

Для кожного з параметрів встановлені межі, щоб уникнути виходу значень за допустимі межі: витрата води (Qw_{ctrl}) обмежена від 0 до 100 г/л/день; потужність нагрівача (Ua_{ctrl}) обмежена від 0 до 300 Вт; потужність аератора ($Paer_{ctrl}$) обмежена від 0 до 50 Вт.

Така система керування дозволяє автоматично регулювати параметри аквапонічної системи для підтримки оптимальних умов для риб і рослин. Керуючі дії базуються на відхиленнях від цільових значень та обмежуються фізичними характеристиками системи (максимальні потужності для насоса, нагрівача та аератора).

У разі необхідності періодичного управління потужністю для насосів, нагрівачів або аераторів, можна використовувати періодичне включення цих пристроїв раз на день. Це підходить для певних систем, де точний контроль в реальному часі не є критичним, але важливе загальне забезпечення необхідних умов протягом доби. При такому підході, потужність насоса, нагрівача або аератора може бути включена протягом певного часу на день.

При використанні періодичного включення можна зменшити загальні витрати енергії, оскільки пристрої не працюватимуть постійно. Це дозволяє зменшити знос обладнання, оскільки пристрої не працюють на максимальній потужності безперервно. Однак, оскільки пристрої працюють лише в певний час, система управління стає простішою і менш затратною для обчислювальних ресурсів та менш точною.

Щоб керувати потужністю насоса, нагрівача та аератора, можна використовувати алгоритм широтно-імпульсної модуляції (ШІМ, PWM). Алгоритм ШІМ дозволяє регулювати подачу потужності до пристроїв, варіюючи тривалість імпульсів (робочий цикл). Це особливо корисно для точного контролю, коли потрібно забезпечити стабільний рівень потужності без значних втрат енергії.

Для кожного з контролерів (насос, нагрівач, аератор) розраховуємо бажану потужність, як описано раніше. ШІМ сигнал генерується в залежності від бажаної потужності:

$$D_{\text{pump}} = \frac{Q_{w\text{ctrl}}}{Q_{\text{max}}}, D_{\text{heater}} = \frac{U_{a\text{ctrl}}}{P_{\text{max}}}, D_{\text{aerator}} = \frac{P_{a\text{ctrl}}}{P_{\text{max}}}, \quad (3)$$

де D – це робочий цикл, що визначає відсоток часу, коли пристрій працює на повну потужність. Для кожного пристрою (насоса, нагрівача, аератора) створюється ШІМ-сигнал з робочим циклом D , що пропорційний розрахованій регульованій потужності.

Наприклад, якщо бажана потужність нагрівача $U_{a\text{ctrl}} = 20$ Вт, а максимальна потужність нагрівача $P_{\text{max}} = 300$ Вт, то робочий цикл буде: $D_{\text{heater}} = 0,067$. Це означає, що нагрівач буде працювати 6,7 % часу на максимальній потужності.

Якщо $Q_{w\text{ctrl}} = 50$ г/л/день і максимальна потужність насоса $Q_{\text{max}} = 100$ г/л/день, то $D_{\text{pump}} = 0,5$ (50 %). Насос буде працювати 50 % часу на максимальній потужності.

Якщо $U_{a\text{ctrl}} = 25$ Вт і максимальна потужність нагрівача $P_{\text{max}} = 300$ Вт, то $D_{\text{heater}} = 0,083$ (8,3 %). Нагрівач буде працювати 8,3 % часу на максимальній потужності.

Якщо $P_{a\text{ctrl}} = 15$ Вт і максимальна потужність аератора $P_{\text{max}} = 50$ Вт, то $D_{\text{aerator}} = 0,3$ (30 %). Аератор буде працювати 30 % часу на максимальній потужності.

ШІМ дозволяє точно регулювати потужність з мінімальними втратами енергії, оскільки пристрої включаються і вимикаються швидко. Регулювання робочого циклу дозволяє точно контролювати параметри системи. ШІМ дає змогу використовувати менше енергії, ніж при постійному включенні пристроїв на повну потужність.

Підсумовуючи розглянуті автоматизовані системи керування за наведеними алгоритмами, можна зробити висновок, що П-регулятор і ШІМ забезпечують ефективніше використання енергії, особливо в системах із частими змінами умов. Наприклад, якщо у системі важлива стабільність рівня кисню або температури, ШІМ або П-регулятор будуть кращими, ніж періодичне вмикання/вимикання. У таблиці 2 наведені порівняння розглянутих алгоритмів.

2. Порівняння алгоритмів керування

Характеристика	Періодичне включення/виключення	ШІМ (цикл 1 день)	П-регулятор
Частота вмикання/вимикання	Один раз на добу	Кілька разів на добу, можна змінювати час циклу	Залежить від похибки (може бути часто)
Регулювання потужності	Фіксоване (час роботи визначається розкладом)	Плавне, через зміну співвідношення імпульсів	Пропорційне до похибки
Середня потужність	Визначається тривалістю роботи	Точно регулюється через ширину імпульсів	Адаптивна, залежить від поточної похибки
Вплив на знос обладнання	Менший – через невелике вмикання	Вищий через часті імпульси	Середній – залежить від інтенсивності змін
Складність реалізації	Низька	Вища	Помірна
Точність регулювання	Низька	Висока	Залежить від параметра
Енергоефективність	Середня залежить від часу роботи	Висока завдяки точному налаштуванню	Висока, оскільки енергія витрачається пропорційно до потреби

На основі проведеного моделювання та аналізу розроблені рекомендації для вибору алгоритму системи керування, які наведені в таблиці 3.

Таким чином, для практичного підходу можна рекомендувати почати із П-регулятора для швидкого налаштування системи, а потім додати ШІМ для прецизійного керування, якщо потрібна вища точність. На рисунку 3 наведена структура системи керування аквапонікою у вигляді імітаційної моделі з підсистемою, яка реалізує автоматичне регулювання рівня, температури та концентрації кисню з локальними П-регуляторами і при значеннях: $prb=10$, цикл збору рослин = 30 днів, $FPs=10$. На рисунку 4 продемонстровані перехідні процеси системи керування аквапонікою з локальними П-регуляторами для стабілізації концентрації кисню, температури та рівня в акваріумі ($Level_{target}=40$ см, $T_{w_{target}}=25$ °C, $QDO_{target}=6$ мг/л).

3. Рекомендації щодо вибору алгоритмів системи керування

Алгоритм	Коли використовувати	Енергоефективність	Рекомендація
Періодичне вмикання/вимикання	<ul style="list-style-type: none"> - У системах із низькою динамікою змін (наприклад, стабільна температура повітря). - Для пристроїв із великою інерцією (нагрівачі, насоси). 	Ефективний для невеликих потреб у зміні параметрів, але може бути енерговитратним, якщо потреби змінюються різко	Простий алгоритм для початкової реалізації в системах без жорстких вимог до точності.
ШПМ	<ul style="list-style-type: none"> - У системах із помірною або високою динамікою змін (наприклад, контроль кисню або температури в змінних умовах). - Для пристроїв із швидкою реакцією (аератори, вентилятори). 	Дуже висока, оскільки потужність точно відповідає поточним потребам.	Використовуйте для прецизійного керування в енергоефективних системах, де важлива точність.
П-регулятор	<ul style="list-style-type: none"> - Для систем, де важлива адаптація потужності в реальному часі, але надмірна складність небажана. - Системи з помірною динамікою змін параметрів 	Висока, оскільки енергія витрачається лише пропорційно до похибки.	<ul style="list-style-type: none"> - Оптимальний вибір для автоматизованих систем із середньою точністю та адаптивністю до змін. - Можна розглядати як перехідний етап до повноцінного ПД-регулятора або ШПМ.

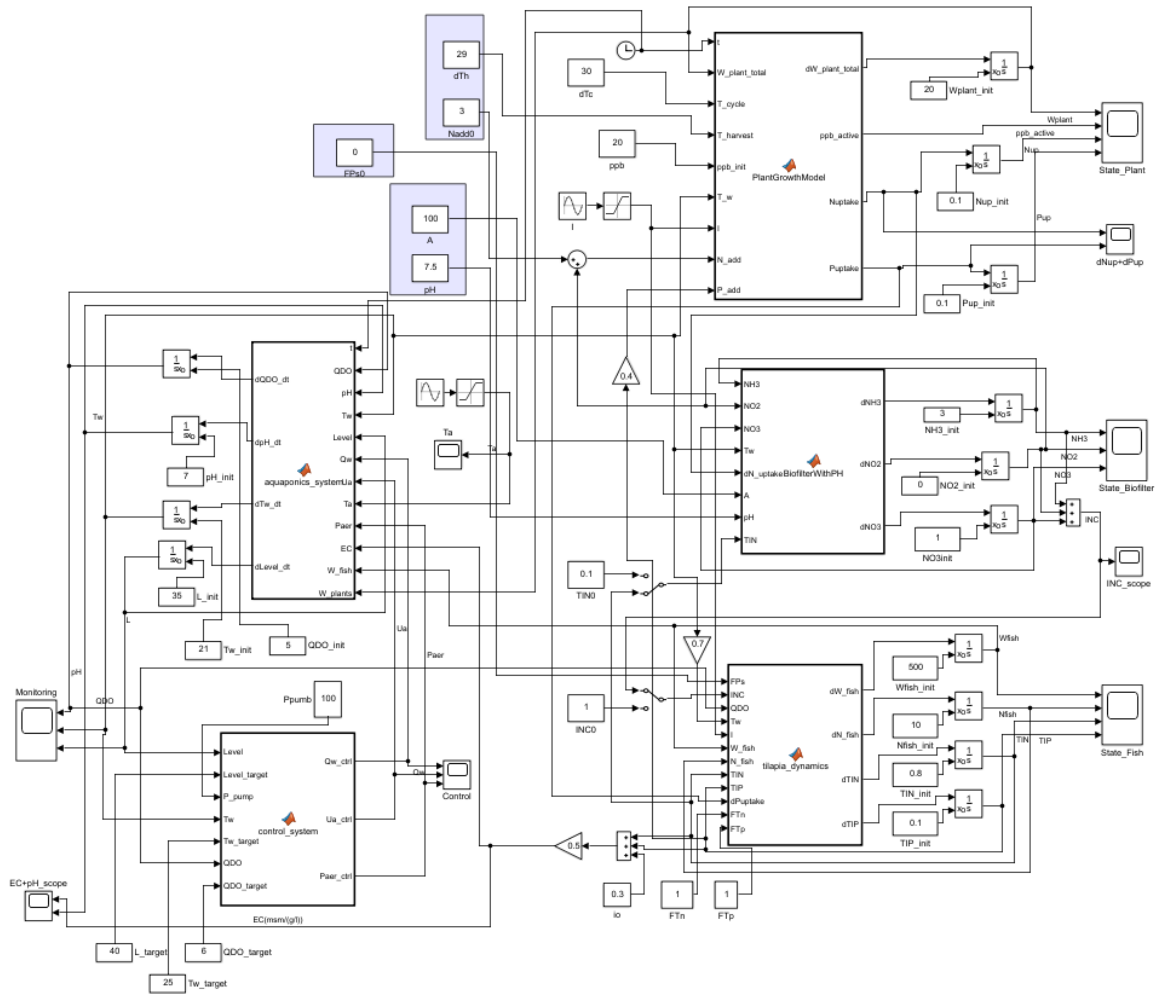


Рис. 3. Структура системи керування аквапонікою у вигляді імітаційної моделі

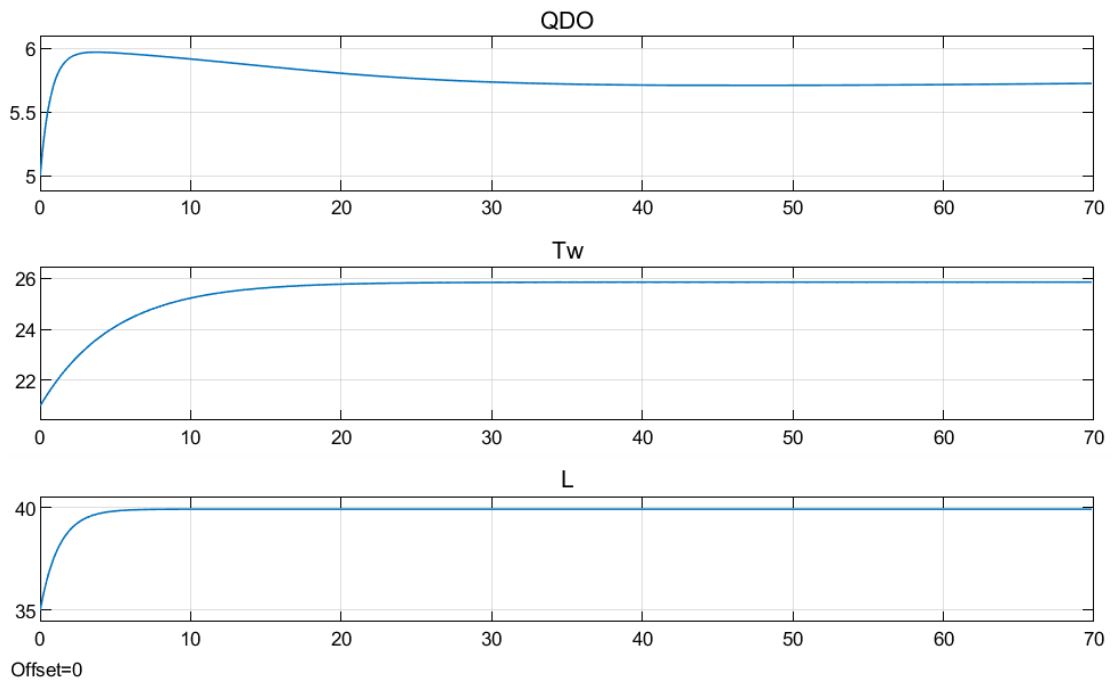


Рис. 4. Перехідні процеси системи керування аквапонікою з локальними П-регуляторами

За результатами моделювання встановлено, що жоден із розглянутих алгоритмів не забезпечує підтримання оптимальних технологічних параметрів аквапонної системи, що вказує на необхідність розробки інтелектуальних алгоритмів, що здатні до прогнозування та навчання.

Висновки і перспективи. У роботі представлено трирівневу систему управління аквапонними системами, що поєднує автоматичні, автоматизовані та ручні процеси для забезпечення її ефективною та адаптивною роботи. Із використанням математичної моделі аквапонної системи проаналізовано основні існуючі алгоритми керування нею: періодичне вмикання/вимикання, ШІМ (широотно-імпульсна модуляція) та П-регулятор. Кожен із них має свої переваги та обмеження, що визначають доцільність їх застосування у різних системах.

Періодичне вмикання/вимикання підходить для систем із низькою динамікою змін та пристроїв із великою інерцією. Це простий і доступний підхід, але менш енергоефективний у випадках різких змін параметрів. Рекомендується для початкових рішень без високих вимог до точності.

ШІМ забезпечує високу енергоефективність та точність, що робить його оптимальним для систем із швидкими змінами умов і пристроїв, які реагують миттєво. Цей метод особливо рекомендовано для енергоефективного прецизійного керування.

П-регулятор є компромісним рішенням для систем із середньою динамікою змін. Він забезпечує високу енергоефективність за рахунок пропорційного регулювання потужності та може слугувати проміжним етапом перед впровадженням складніших алгоритмів.

Таким чином, жоден із розглянутих алгоритмів не забезпечує підтримання оптимальних технологічних параметрів, а вибір алгоритму керування залежить від специфіки системи, вимог до точності керування та енергоефективності. У майбутньому планується розробка та впровадження інтелектуальних алгоритмів керування аквапонікою для підвищення ефективності системи та якості кінцевої продукції.

Список використаних джерел

1. Bradley M., Lane S., Woodbury N. Modeling and Control of an Aquaponics System [Електронний ресурс]. URL: https://byu.apmonitor.com/do/uploads/Main/Report_aquaponics2018.pdf (дата звернення: 10.11.2024).
2. Conijn J. G., Bindraban P. S., Schröder J. J., Jongschaap R. E. E. Can our global food system meet food demand within planetary boundaries? *Agriculture Ecosystems & Environment*. 2018. Vol. 251. С. 244–256. DOI: 10.1016/j.agee.2017.06.001.
3. Goddek S., Joyce A., Kotzen B., Burnell G. M. Aquaponics Food Production Systems. 2020.
4. Hager J., Bright L. A., Tidwell J. H., Dusci J. A Practical Handbook for Growers AQUAPONICS Production Manual [Електронний ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/355972997_A_Practical_Handbook_for_Growers_AQUAPONICS_Production_Manual (дата звернення: 10.11.2024).
5. Immacolata V., Pontrandolfi A., Manelli A. The Employment Crisis and Green Orientation in Agriculture: *New Educational Models*. 2016. DOI: 10.1016/j.aaspro.2016.02.074.
6. Junge R., König B., Villarroel M., Komives T., Jijakli M. H. Strategic Points in Aquaponics [Електронний ресурс]. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4441/9/3/182> (дата звернення: 10.11.2024).
7. Karimanzira D., Rauschenbach T. An intelligent management system for aquaponics [Електронний ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/350632213_An_intelligent_management_system_for_aquaponics (дата звернення: 10.11.2024).
8. Kotzen B., Appelbaum A. An Investigation of Aquaponics Using Brackish Water Resources in the Negev Desert. 2010. DOI: 10.1080/10454438.2010.527571.
9. Lastiri D. R. Modelling and identification of water and nutrient balances in aquaponics. 2021. DOI:10.18174/548235.
10. Pedersen S. Simulation and Optimization of Recirculating Aquaculture Systems. *Department of Electrical Engineering Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden*. 2018. [Електронний ресурс]. URL: https://research.chalmers.se/publication/505266/file/505266_Fulltext.pdf (дата звернення: 10.11.2024).
11. Rockström J., W. et al. Planetary boundaries: Exploring the safe operating space for humanity [Електронний ресурс]. URL: <https://pubs.giss.nasa.gov/abs/ro06010m.html> (дата звернення: 10.11.2024).
12. Van Vuuren D. P., Smith S. J., Riahi K. Downscaling socioeconomic and emissions scenarios for global environmental change research. [Електронний ресурс]. URL: <https://wires.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/wcc.50> (дата звернення: 10.11.2024).
13. Verma A. K., Chandrakant M. H., John V. C., Peter R. M., John I. E. Aquaponics as an integrated agri-aquaculture system (IAAS): *Emerging trends and future prospects. Technological Forecasting and Social Change*. 2023. Vol. 194. 122709. DOI: 10.1016/j.techfore.2023.122709.

14. Залозний Р. В., Заєць Н. А. Математичне моделювання процесів біофільтрації в аквапонних системах. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. 2024. Том 30, №5. С. 25–33.

15. Залозний Р. В., Заєць Н. А. Системний аналіз і структура керування аквапонними системами. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. 2024. Том 30, №1. С. 7–16.

Журнал «Наукові праці Національного університету харчових технологій» включено в перелік наукових фахових видань України з технічних (спеціальності — 121, 126, 133, 141, 144, 151, 162, 181) та економічних наук (спеціальності — 051, 073, 075), категорія «Б» (Наказ МОН України № 975 від 11.07.2019), в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук.

References

1. Bradley, M., Lane, S., & Woodbury, N. (2018). *Modeling and control of an aquaponics system*. Retrieved November 10, 2024, from https://byu.apmonitor.com/do/uploads/Main/Report_aquaponics2018.pdf

2. Conijn, J. G., Bindraban, P. S., Schröder, J. J., & Jongschaap, R. E. E. (2018). Can our global food system meet food demand within planetary boundaries? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 251, 244–256. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.06.001>

3. Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., & Burnell, G. M. (Eds.). (2020). *Aquaponics food production systems*.

4. Hager, J., Bright, L. A., Tidwell, J. H., & Dusci, J. (2021). *A practical handbook for growers: Aquaponics production manual*. Retrieved November 10, 2024, from https://www.researchgate.net/publication/355972997_A_Practical_Handbook_for_Growers_AQUAPONICS_Production_Manual

5. Immacolata, V., Pontrandolfi, A., & Manelli, A. (2016). The employment crisis and green orientation in agriculture: New educational models. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 6, 116–122. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2016.02.074>

6. Junge, R., König, B., Villarroel, M., Komives, T., & Jijakli, M. H. (2017). Strategic points in aquaponics. *Water*, 9(3), 182. Retrieved November 10, 2024. Available at: <https://www.mdpi.com/2073-4441/9/3/182>

7. Karimanzira, D., & Rauschenbach, T. (2021). An intelligent management system for aquaponics. Retrieved November 10, 2024. Available at: https://www.researchgate.net/publication/350632213_An_intelligent_management_system_for_aquaponics

8. Kotzen, B., & Appelbaum, A. (2010). An investigation of aquaponics using brackish water resources in the Negev Desert. *Journal of Applied Aquaculture*, 22(4), 297–315. Available at: <https://doi.org/10.1080/10454438.2010.527571>

9. Lastiri, D. R. (2021). *Modelling and identification of water and nutrient balances in aquaponics*. DOI:10.18174/548235

10. Pedersen, S. (2018). *Simulation and optimization of recirculating aquaculture systems*. Department of Electrical Engineering, Chalmers University of Technology. Retrieved November 10, 2024. Available at: https://research.chalmers.se/publication/505266/file/505266_Fulltext.pdf
11. Rockström, J., W. et al. (2009). Planetary boundaries: Exploring the safe operating space for humanity. Retrieved November 10, 2024. Available at: <https://pubs.giss.nasa.gov/abs/ro06010m.html>
12. Van Vuuren, D. P., Smith, S. J., & Riahi, K. (2010). Downscaling socioeconomic and emissions scenarios for global environmental change research: A review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 1(3), 393–404. Available at: <https://doi.org/10.1002/wcc.50>
13. Verma, A. K., Chandrakant, M. H., John, V. C., Peter, R. M., & John, I. E. (2023). Aquaponics as an integrated agri-aquaculture system (IAAS): Emerging trends and future prospects. *Technological Forecasting and Social Change*, 194, 122709. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122709>
14. Zaloznyi, R., & Zaiets, N. (2024). Mathematical modeling of biofiltration processes in aquaponic systems. *Scientific Works of National University of Food Technologies*, 30(5), 25–33.
15. Zaloznyi, R., & Zaiets, N. (2024). System analysis and control structure of aquaponic systems. *Scientific Works of National University of Food Technologies*, 30(1), 7–16.

ANALYSIS OF ALGORITHMS AND DEVELOPMENT OF THE STRUCTURE OF AQUAPONICA CONTROL SYSTEM

R. Zaloznyi

Abstract. *The article analyzes the distribution of control tasks in an aquaponic system and presents a three-level aquaponic system control system that combines automatic, automated and manual processes to ensure its efficient and adaptive operation. Based on the mathematical model of the aquaponic system, the analysis of the main control algorithms is carried out: periodic on/off, pulse width modulation (PWM) and P-controller. Their advantages, disadvantages and areas of application are considered.*

Using the mathematical model of aquaponics, the structure of the control system was created, which made it possible to model and analyze the main control algorithms and, based on it, develop recommendations for choosing a control system algorithm.

Based on the modeling results, it was found that none of the considered algorithms provides optimal process parameters, requiring the future development of intelligent aquaponics control algorithms aimed at improving the efficiency of the system and the quality of the final product.

Key words: *aquaponics, control system, control algorithms, modeling*