

УДК 681.518.3

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-25-16

**Осінов С. М.**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» м. Київ, Україна

## ЕФЕКТ БІОЛОГІЧНОГО ЗВОРОТНОГО ЗВ'ЯЗКУ У БІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

*У статті розглядається проблемні питання при синтезі технічної системи з присутністю об'єкту біологічного походження з використанням класичної теорії управління. Біологічний зворотний зв'язок відіграє ключову роль у зберіганні відносної динамічної стійкості параметрів і функцій. Для отримання прогнатованих властивостей системи та оцінки кількісних змін, що відбулись в системі підчас отримання якісних зрушень властивостей у біологічному об'єкті, розглянуто умови вирішення завдання зворотного синтезу сенсорної частини біотехнічної системи. Метою є формалізація причинно-наслідкових зв'язків для отримання альтернативи суб'єктивізму експертної оцінки. Відтворення поведінки системи керування розглянуто з позиції методу моделювання на основі електробіоаналогій як фактору впливу на архітектуру та функціональні принципи нейроморфних твердотільних сенсорів.*

**Ключові слова:** біотехнічні системи, інтелектуальні системи керування, твердотільні компоненти, нейронні мережі, інтелектуальна система керування.

**Постановка проблеми.** Керування біотехнічною системою передбачає наявність певної стратегії яка вибудовується на основі знань про поведінку біологічного об'єкту. Це може бути база знань з прецедентів у вигляді діаграми станів або іншому вигляді але обов'язково з урахуванням станів які неприпустимі. Тобто, мають бути враховані обмеження і відповідно наведено обґрунтування дійсних обмежень, а для самої системи повинна має бути встановлено ступень прогнозованості стану біологічного об'єкта. Важливе місце в цьому процесі займає визначення ресурсних можливостей з точки зору досягнення максимального ефекту від утримання біологічного об'єкта, зокрема його продуктивність.

Подібно завдання відоме з позиції організації структури технічної складової біотехнічної системи. Розвиток технічних систем, як буде показано нижче, має рекурсивний характер але на рівні біологічної структури все виглядає не зовсім однозначно. Біологічний об'єкт на шляху свого існування переживає різні стадії розвитку, це по –перше, а по-друге, біологічні об'єкти потрібно розглядати суворо диференційно, при цьому рівень розбіжностей від класу біологічного об'єкту в процесі до його видів зростає. Окрім мікроклімату який утворюється технічною частиною системи за технологічними параметрами навколишнє середовище формується навколо симбіозу біологічного об'єкту в процесі життєдіяльності. Багатокомпонентність біотехнічної системи породжує багатоваріантність інженерно-проектних рішень, серед яких, звичайно, шукають оптимальне. Наявні розбіжності між фізичною сутністю і фізикою біологічного об'єкта можливо пояснювати засобами моделювання, зокрема з використанням електробіоаналогій, але зв'язки в подібній моделі потрібно з'ясувати. Сучасні підходи до моделювання базуються багато в чому на основі емпіричного досвіду, метод проб та помилок це збитковий шлях по відношенню до отримання продуктивності та призводить до констатації результатів попередньо обраного рішення. Модель біотехнічної системи є залежною від людини яка обмежена власним досвідом знань як технічних, так і біологічних, має відбутись певна конвергенція знань для набуття статусу експерта. Технічна частина системи переважно дискретна за характером, біологічна система має поступовий, неперервний та послідовний розвиток і якщо відсутній зворотний зв'язок між технічною та біологічною складовими системи відсутнє розуміння того що відбувається в системі. По відношенню до біологічного об'єкту завжди існує певна невизначеність, тому невідомо який результат по завершенню буде отримано, що є наслідком самоорганізаційних явищ які відбуваються з використанням внутрішнього зворотного зв'язку самому біологічному об'єкті. Згідно до класичної теорії управління серед технічних складових присутній блок прийняття рішення за допомогою якого вибудовують зворотний зв'язок с біологічним об'єктом але залежність від суб'єктивного фактору зберігається. Біологічний об'єкт залишається «чорною скринею» і судження виключно за зовнішніми ознаками ніщо інше як результат дій, що відбулись у минулому. Дійсною регуляційною моделлю є модель для якої

шукане управління визначають як функцію змінних, що описують внутрішній стан біологічного об'єкта. У зв'язку з цим моделювання та контроль динамічних процесів для вирішення завдання оцінювання стану біологічного об'єкта є актуальною науковою проблемою.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Моделювання станів біологічного об'єкту є одним з швидкозростаючих напрямків і є фактором впливу на розвиток теорії управління. Методи в яких почали використовувати біологічний зворотній зв'язок з живими системами на основі зміни різних параметрів системно почали розроблятися приблизно з середини 20-го століття. Метод швидко знайшов застосування у медицині, а метою метода було вплив на соматичний стан організму людини. Основою методу стало використання негативного зворотного зв'язку та стимуляція саморегулювання процесів життєдіяльності по окремих параметрах. Для зв'язаних параметрів які перебувають у активній взаємодії питання отримання інформативної складової параметричних сигналів залишається проблемною частиною. Для біологічних об'єктів з відсутністю вищої нервової системи, зокрема рослин, застосування методу має власні особливості. Набуває розвитку метод фітомоніторингу, параметри отримані при спостереженні використовують як технологічні в системі управління для реалізації динамічної моделі керуванням і розглядаються за участю експертів. Априорі зрозуміло, що біологічний об'єкт на шляху свого еволюційного розвитку отримує зміни його станів які бажано вимірювати зовнішніми засобами та отримувати кількісну характеристику. Враховувати та віднести вимірну характеристику до класу технологічних параметрів системи управління і таким чином впливати технічними засобами в межах автоколивальної підтримки рівня технологічного параметра є завданням теоретичним. Проблемним при цьому є встановлення математичного опису для моделі блока прийняття рішення який має конкретні проектно-конструкторські рішення для обраного конкретного біологічного об'єкту. Тобто, у загальному підході до автоматичного керування процесами утримання біологічних об'єктів сільськогосподарського призначення постійно спостерігається зрушення парадигми щодо блоку прийняття рішення у системі управління. Аналіз технічних рішень наведених у [1-8] підтверджують цю тенденцію. Загальним недоліком згаданих технічних рішень слід вважати те, що присутнє системне запізнення в часі отримання даних про стан біологічного об'єкту для системи управління. Невизначеність стану призводить в свою чергу до потреби у наявності експертного знання та досвіду у обробці сигналів. Система управління оперує параметрами технологічного середовища. Інформація стосовно змінних власно біологічного об'єкта обмежена, але очікувати реакції з боку біологічного об'єкта на зміну технологічного параметру потрібно. Деяке пришвидшення надає використання методів моделювання спрямованих на прогнозування, наприклад, це може бути модель прогнозування майбутніх температурних збурень [2] або інша. Застосування такого підходу не виключає участі у процесі керування системою технолога, який може вводити корективи та вносити суб'єктивне уявлення про вплив технологічних параметрів на продуктивність при утриманні біологічного об'єкта у складі системи. Так, на практиці, технологи використовують замість стратегії заснованої на основі аналізу прогностичних моделей стратегію керування заснованою на автоколивальних процесах зміни параметрів технологічного процесу, що може бути виправдано у довгостроковій перспективі експлуатації біологічного об'єкта у складі системи, хоча в дійсності, процес параметричного переключення станів біологічного об'єкта відбувається за біфуркаційними правилами. Висновки стосовно стану власно біологічного об'єкта в цьому випадку робляться інтуїтивно на основі власного досвіду. В умовах промислового використання це ні є перспективним. Використання робототехнічної підсистеми [8] це здоровий, але скоріше півкрок до забезпечення продуктивності в міру низької функціональності робототехнічної системи, але залишається можливість спостерігати тенденції у зміні параметрів і це досить доступна річ. Згаданий робототехнічний комплекс обмежено вже у початковій частині проектного рішення інформативне поле параметрів для спостереження має обмежений вигляд, підсистема виконує функцію збору даних по технологічних параметрах у 2D просторі. Блок з аналізу динаміки взаємодії з біологічним об'єктом не має бути з використанням виключно адаптації до низькочастотного автоколивального стану. В певні моменти часу у біологічному об'єкті спостерігають вмикання так званого «біологічного тригера» і наслідком цього є зміна динамічного стану.

Аналіз патентної ситуації доводить використання переважно фізіологічних макровеличин біологічних об'єктів в якості технологічних параметрів системи управління. Розширення кола параметрів на основі фізичних принципів та урізноманітнити функціональні можливості сенсорних електронних компонент в системах малого форм-фактору розглядається як перспективне завдання до їх застосування *in situ*.

**Мета роботи.** Метою даної роботи є встановлення зв'язків біологічного об'єкта, у вигляді моделі спрощеної до певної структурної одиниці, використання яких надає змогу для розгляду технологічних засад реалізації сенсорної частини біотехнічної системи з біологічним зворотним зв'язком. Актуальним завдання цього є розширення функціональних можливостей сенсорної частини на основі конденсованих станів у твердому тілі та застосування відповідних матеріалів мікро- наноелектроніки в сенсорах призначених для мультипараметричної підтримки гомеостазу біологічного об'єкту.

**Виклад основного матеріалу.** Встановлення загального вигляду математичної залежності на основі законів самоорганізації виглядає надто складним завданням але інтеграційна складова законів є передумовою для застосування її в дисипативних системах. Любий опис поведінки біологічної системи має бути інваріантним незалежно в яких координатах він визначається. Інваріантність судження засновано тим, що сутність процесів залишається незмінною. Проходженню різних станів біологічним об'єктом відповідає певний рівень гомеостазу і кожний рівень во взаємодії з іншими дає внесок в підтримку життєдіяльності. Чи є це простою суперпозицією? - це питання залишаємо відкритим, але потрібно визнати наявність ваги окремих процесів, внаслідок дії абіотичних факторів, здатних впливати на сталий розвиток. Недооцінка цього має негативні наслідки для продуктивності біотехнічної системи. Зміна стану біологічного об'єкта, в подальшому біологічної системи, можлива за різним сценарієм: «м'який» режим з поступовою зміною параметрів або «жорсткий» з стрибкоподібною зміною параметрів і який припускає наявність фазових переходів які супроводжують ті самі зміни і які характеризують ступенем упорядкованості. Отримання якісного результату надає можливість отримати фізичне уявлення щодо спектроскопії станів біологічної системи. У [9] для розв'язку проблем системи управління запропоновано використання сценарно-синергетичного підходом у вигляді математичної моделі з застосуванням нейромережевої технології. Визначення станів і встановлення відповідної шкали порядку біологічної системи для дослідження та визначення стійкості самої системи у вигляді цифрового двійника краще за якісний опис, але результат повинний мати біологічну інтерпретацію у термінах видимих проявів. Сучасна тенденція, як новітній напрям, отримала назву «System of Systems» (SoS) і це сукупність кількох незалежних систем як частина складнішої системи. Система розглядається як група взаємодіючих, взаємопов'язаних і взаємозалежних компонентів, які утворюють складне і єдине ціле. На рисунку 1 наведено як взаємодіють інформаційні потоки для розподіленої сенсорної системи для об'єднання своїх ресурсів, створюючи нову та більш складну систему. Окремі системи в SoS працюють разом, щоб забезпечити функціональні можливості та продуктивність, яких жодна з незалежних систем або складових систем не могла б виконати самостійно. Дані, різні за типом, на виробничій платформі збільшуються та утворюють потенціал для створення інформативної цінності. Традиційні системи керують структурованими даними, застосовуючи фіксовані моделі для аналізу та розуміння минулого та для прогнозування. Використання сенсорної платформи, що керує даними застосовуючи аналітику біологічного зворотного зв'язку на основі поглибленого знання, відповідає за покращення у прийнятті рішень. Для реалізації взаємодій потрібні нові сенсорні технології та компоненти здатні впливати на структуру нейроморфної платформи.

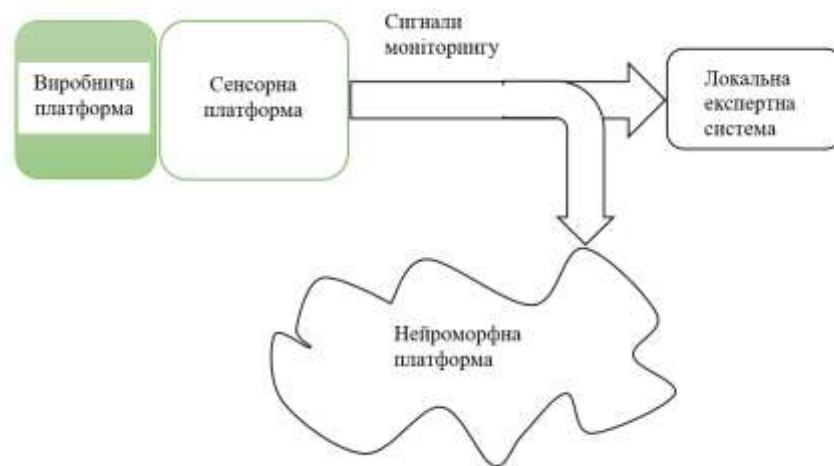


Рисунок 1 – Приклад інформаційних взаємодій системи

Таким чином, виникає завдання у проведенні ідентифікації ланок біотехнічної системи, цьому сприяє метод еквівалентних моделей, здатних замінити об'єкт, для отримання об'єктивної відповідності та оцінки варіантів еволюції біологічної системи. Зручним способом реалізації методу є застосування електричних еквівалентних схем для проведення функціональної ідентифікації і тестування за допомогою сигналів [10]. Проблемним питанням є визначення регуляційного процесу для синтезу сенсорної платформи внаслідок скритності параметрів біологічної системи і це підштовхує до пошуку нових аналогій [11]. Існують аспекти в розумінні складності цього питання, зокрема, переходи біологічної системи у різні типи розвитку який може відбуватись як нормальним так аномальним шляхом. Важливим є оптимальний час переключення: надто ранній, а так само і затягнуте переключення однаково погано тому, що ресурси будуть швидше за все використані не за призначенням. У простішому варіанті для структурної одиниці виробничої платформи застосуємо рівняння виду:

$$\frac{dx}{dt} = f(x, \alpha). \quad (1)$$

Функціональна залежність правої частини рівняння (1) від змінної  $\alpha$  наведено на рисунку 2.

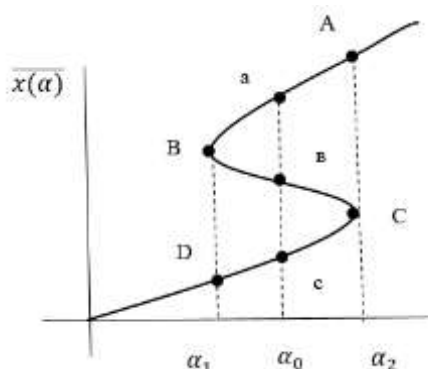


Рисунок 2 – Стационарні стани системи з зворотним зв'язком

З рисунку 2, зрозуміло, як система може переходити з одного стійкого стану у інший. Гілки від A до B, та від D до C відповідають стійкому режиму розвитку подій в біологічній системі. Швидкість зміни обумовлено нахилом вказаних гілок у залежності, а напрямку розвитку змін біологічної системи визначає знак її збільшення/зменшення. Параметри  $\alpha_1, \alpha_2$  при досягненні яких система стрибкоподібно змінює свій стан визначають як біфуркаційні параметри. Періодичний рух вздовж переходів визначає певний цикл подій хвильового характеру. Для реалізації функціональної залежності у вигляді електричного аналога запропоновано використовувати напівпровідникову структуру з симетричною вольт-амперною характеристикою (ВАХ) S-типу. Це означає, що симетрична діодна структура є такою, що містить два однакові  $p-n$  переходи, які ввімкнені послідовно та зустрічно один до одного. Для випадку  $n^+ - p^+ - n^+$  структури на основі тунельного ефекту, опір електронейтральних областей у рівноважному стані значно менший за опори  $p-n$  переходів і можна вважати, що вся зовнішня напруга спадає лише на  $p-n$  переходах. В першому наближенні симетрична діодна структура працює аналогічно до послідовного ланцюгу зустрічно ввімкнених діодів. Але, параметри  $p-n$  переходу залежать від температури та/або концентрації за складними законами, отримання температурних залежностей в аналітичному вигляді відбувається за складною процедурою. Аналіз графічно побудованої залежності від концентрації та температури для прямої та зворотної гілок ВАХ структури встановлено, що температурний коефіцієнт напруги (ТКН) прямої гілки ВАХ є від'ємним та змінюється в вузьких межах від 1,9 до 2,4 мВ, що є близьким до характеристик реальних діодів. При цьому аналіз ТКН зворотної гілки теж відповідає відомим принципам – ТКН є додатною. Характер зміни ТКН також відповідає практичним результатам, а саме, збільшується зі збільшенням температури та зменшується зі збільшенням концентрації домішок для зворотної гілки та збільшується зі збільшенням концентрації домішок для прямої гілки ВАХ. На рисунку 3 наведено ВАХ запропонованої структури з використанням тунельного ефекту, технологічні аспекти виготовлення інтегрального твердотілого приладу наведено у [12].

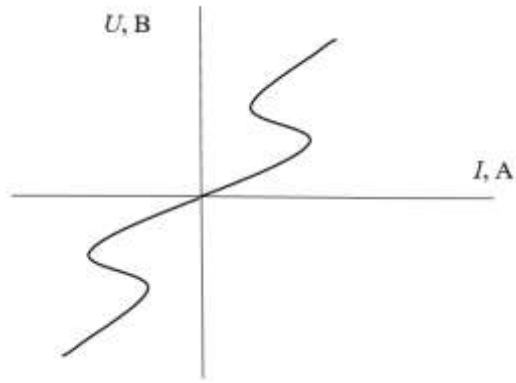


Рисунок 3 – ВАХ симетричної термокомпенсованої діодної структури

Отже, бачимо, що за формою наведена вольт-амперна характеристика є подібною до функціональної залежності станів біологічної системи за наявності біфуркаційної змінної, що дозволяє реалізувати симуляцію сенсору з адаптивним управлінням. В загальному випадку для аналізу зміни динаміки біологічної системи прилад можливо використовувати в сенсорній платформі системи як цифровий двійник-еталон, що використовує функції чутливості замкненої системи відносно локальної системи управління.

**Висновки.** Проаналізовано технічні рішення з проектування систем управління біотехнічними системами та визначено рекурсивний характер удосконалень системи управління. Подальша еволюція систем управління біотехнічними системами залежна від елементної бази і пов'язана її розвитком.

Визначено категорію сенсорної частини системи управління біотехнічною системою - адаптивні сенсори, ознакою яких є використання біологічного зворотного зв'язку, як нову категорію.

Встановлено виклики які мають бути забезпечені для досліджень біологічної системи у динамічному режимі, а саме: обробка реакцій в сенсорах викликаних тест-впливом за допомогою методів перетворення сигналів; розвитку у напрямку спектроскопії конденсованих станів біологічного об'єкта сільськогосподарського призначення у складі біотехнічної системи для визначення сенсорних відгуків на зовнішні енергетичні впливи.

#### Інформаційні джерела

1. Патент на корисну модель 76175 UA, МПК (2012.01) G05B 13/00 Система управління процесом утримання біологічних об'єктів / В. П. Лисенко, В. М. Штепа, Н. А. Заєць, І. М. Болбот, А. О. Дудник; опубл. 25.12.2012 // Бюл. № 24. 3 с. База патентів України. 3 с.
2. Патент на корисну модель 76177 UA, МПК (2012.01) G05B 13/00 Система управління процесом утримання біологічних об'єктів / В.П. Лисенко, В.М. Штепа, Б.Л. Голуб, В.Л. Щербатюк; опубл. 25.12.2012// Бюл. № 24. 4 с. База патентів України. 4 с.
3. Патент на корисну модель 85587 UA, МПК (2013.01) G05B 13/00 Система управління біотехнічними об'єктами / В. П. Лисенко, В. М. Решетюк, В. М. Штепа; опубл. 25.11.2013// Бюл. № 22. 3 с. База патентів України. 4с.
4. Патент на корисну модель 86252 UA, МПК (2013.01) G05B 13/00 Система управління біотехнічними об'єктами / В. П. Лисенко, Н. А. Заєць, В. М. Штепа, А. О. Дудник; опубл. 25.12.2013 // Бюл. № 24. 4 с. База патентів України. 4 с.
5. Патент на корисну модель 88809 UA, МПК (2015.01) G05B 13/00 Пристрій штучного клімату / В. П. Лисенко, В. О. Мірошник, В. М. Штепа, І. М. Болбот, Т. І. Лендел, А. О. Дудник; опубл. 10.04.2014 // Бюл. № 7. 4 с. База патентів України. 4 с.
6. Патент на корисну модель 92971 UA, МПК (2014.01) G05B 13/00 Система управління біотехнічними об'єктами / В. П. Лисенко, В.М. Штепа, Н. А. Заєць, І. М. Болбот, А. О. Дудник, Т.І. Лендел; опубл. 10.09.2014 // Бюл. № 17. 2 с. База патентів України. 5 с.
7. Патент на корисну модель 95200 UA, МПК (2014.01) G05B 13/00 Система управління водоочисним та водопідготовчим обладнанням / В. М. Штепа; опубл. 10.12.2014 // Бюл. № 23. База патентів України. 4 с.
8. Патент на корисну модель 95612 UA, МПК (2015.01) G05B 13/00 Система управління біотехнічними об'єктами / В. П. Лисенко, І. М. Болбот, В. М. Штепа, Т. І. Лендел, І. І. Чернов; опубл. 25.12.2014 // Бюл. № 24. – 4 с. – База патентів України. – 4 с.
9. Поліщук Д. В., Заєць Н. А. Система керування інформаційними потоками тепличного

комплексу на основі сценарно-синергетичного підходу. Наукові праці НУХТ: т.28, 2022. С.7-15. DOI: 10.24263/2225-2924-2022-28-4-3.

10. Осінов С. М. Визначення електричних властивостей біологічних тканин з перших принципів. Сучасні технології біомедицинської інженерії - 2023р.: Матеріали II міжнародної науково-технічної конференції; Одеса, Одеська політехніка, 17-19 травня 2023р. С.105-109.

11. Осінов С. М., Єрьоменко І. В. Про відповідність процесів у біологічних тканинах та низькотемпературної напівпровідникової плазмі. – Збірник матеріалів конференції «ХІ Науково-технічна конференція молодих вчених та спеціалістів «Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є.Пухова НАН України»; Київ, ІПМЕ ім.Г.Є.Пухова, 17 травня 2023 р. С.175-177.

12. Патент на корисну модель 129615 UA МПК(2018.01) H01L 29\00 Напівпровідниковий прилад / О. В. Борисов, С. М. Осінов, Б. І. Луцина, Г. В. Шевлякова; опубл. 12.11.2018 // Бюл. № 21. 4 с. База патентів України. 4 с.

**Osinov S.**

National Technical University of Ukraine «Ihor Kyiv Polytechnic Institute Sikorskyi», Kyiv, Ukraine

### **THE EFFECT OF BIOLOGICAL FEEDBACK IN BIOTECHNICAL SYSTEMS**

*This article considers problematic issues in the synthesis of a technical system with the presence of an object of biological origin using classical management theory. Biological feedback plays a key role in maintaining the relative dynamic stability of parameters and functions. In order to obtain the programmed properties of the system and to evaluate the quantitative changes that occurred in the system during the obtaining of qualitative shifts in the properties of the biological object, the conditions for solving the problem of the reverse synthesis of the sensor as a part of the biotechnical system were considered. The goal is to formalize cause-and-effect relationships in order to obtain an alternative to the subjectivism of expert evaluation. Reproduction of the behavior of the control system is considered from the point of view of the modeling method based on electrobioanalogies as a factor influencing the architecture and functional principles of neuromorphic solid-state sensors.*

**Keywords:** *biotechnical systems, intelligent control systems, solid-state components, digital information technologies, neural networks.*