

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА, КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 579.6:62 – 52

СИСТЕМНА ЗАДАЧА УПРАВЛІННЯ БІОТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

Ладанюк А.П., Кишенько В.Д., Ладанюк О.А.

Біотехнологічні процеси (БТП) широко використовуються в харчовій та переробній промисловості, зокрема промислове вирощування мікроорганізмів, рослинних та тваринних клітин застосовують для отримання багатьох цінних сполук – ферментів, гормонів, амінокислот, вітамінів, антибіотиків, метанола, органічних кислот (оцтової, лимонної, молочної). БТП різного призначення (культивування, біосинтез, біокаталізація, утилізація) можна виділити у багатьох галузях: хлібопекарському виробництві (бродіння і визрівання тіста); дріжджевому (вирощування дріжджів); спиртовому (вирощування дріжджів і бродіння); пивоварному (вирощування пивних дріжджів і бродіння сусла); виноробстві, виробництві молочних продуктів та інш. Перспективи розвитку ряду харчових технологій безпосередньо пов'язані з досягненнями в галузі застосування саме біотехнологічних процесів.

Задача управління БТП має два взаємозв'язаних аспекти. Перший полягає у вивченні динаміки систем при постійних значеннях параметрів управління. При цьому досліджується стійкість стаціонарних станів, аналіз процесів на втрату стійкості та народження автоколивань, виникнення хаотичних структур, вивчення параметричних меж, тобто досліджується поведінка системи при різних значеннях параметрів порядку. Другий аспект задачі управління полягає у вивченні реакцій БТП на змінювання управляючих параметрів в процесі руху системи. Тут вирішуються питання керованості біотехнологічних систем і проблема вирішення задачі оптимального управління. Вибір оптимального технологічного режиму БТП тільки шляхом дослідного вивчення процесу практично неможливий. Лише сучасні технологічні методи дослідження складних динамічних систем дозволяють враховувати вплив багатьох факторів і здійснити оптимізацію процесу з уточненням при виробничих випробовуваннях.

Для забезпечення високої ефективності БТП необхідно визначити формування такого управління, яке враховує особливості об'єкта, зовнішнього середовища та наявність суттєвих невизначеностей, які відповідають природі цих процесів як складних хіміко-технологічних систем з характерними причинно-наслідковими ознаками. Системний аналіз БТП приводить до визначення їх ієрархічної структури за рівнями:

- функціонування окремих клітин з урахуванням внутрішньоклітинних явищ та локальних характеристик середовища;
- сукупності ефектів на рівні агрегатів, що враховує різний розвиток клітин, розподілених у просторі;
- переносу маси, енергії та імпульсу в гетерогенному середовищі через границю фаз. При цьому враховуються нерівноважності гетерогенної системи за складом, температурою, розбіжності швидкостей фаз;
- ефектів руху дисперсної фази в обмеженому об'ємі середовища, зокрема турбулізації суцільної фази, змінювання траєкторії руху, перерозподілу полів концентрацій, температур та тисків в елементах дисперсної фази, гасіння турбулентних пульсацій суцільної фази за рахунок дисипації їх енергії в теплоту. На цьому рівні визначається гідродинамічна ситуація в локальному об'ємі апарата (локальна гідродинаміка);

- гідродинамічної ситуації на макрорівні в апараті з урахуванням гідродинамічної структури потоків.

Моделювання БТП є складною задачею. Таким виробництвом властиве протікання ряду нестационарних процесів; велике число розподілених в часі і просторі параметрів і складність зв'язків між ними; неперервне змінювання технологічних параметрів і властивостей популяцій, що характеризують поведінку біотехнологічних систем (наприклад, народжуваність, смертність, наявність сторонньої мікрофлори і т.п.), а також інші фактори, що визначають якість продукції.

Таким чином, побудова системи управління БТП як складною хіміко-технологічною системою є системною задачею, для розв'язання якої необхідно виконати процедури: розробка математичних моделей об'єкта; урахування факторів невизначеності; розробка спостерігачів стану об'єкта; знаходження ефективного управління (синтез регуляторів); оцінювання якості системи управління на основі обраних критеріїв. Системи управління повинні мати властивості самоорганізації, адаптації, робастності та оптимальності. При цьому необхідно враховувати колективну поведінку взаємодіючих часток, рух яких визначається законами збереження енергії та речовини. Це дає можливість отримати ймовірнісні властивості частинок як результат колективного руху та взаємодії, а стан системи знаходиться шляхом осереднення динамічних змінних кооперативних процесів. БТП мають особливі властивості щодо нелінійності, нестійкості, нерівноважності, їх розвиток характеризується різноманітними флуктуаціями, в ході яких виникають точки біфуркацій, які визначають розвиток процесів (напрямків змінювання станів системи). Крім цього, часто визначальну роль відіграють явища самоорганізації, можливість їх спонтанного виникнення із безпорядку та хаосу в дисипативних структурах [1].

Системний аналіз БТП приводить до необхідності застосування методів нерівноважної термодинаміки відкритих систем та нелінійної динаміки, що дозволяє виявити нові процеси, пов'язані з явищами самоорганізації та структуроутворення, які необхідно враховувати при створенні ефективної системи автоматизації. Це стосується синергетичного підходу, який приводить до таких висновків [1,2]:

- в математичних моделях БТП використовуються стохастичні диференціальні рівняння, які відображують єдність та взаємодію детермінованих і випадкових складових;
- за умов біфуркаційної нестійкості та відсутності зовнішніх випадкових збурень в нелінійних динамічних процесах можуть виникати хаотичні процеси як тимчасові впорядковані структури;
- при нерівноважних фазових переходах в нові структурні стани динамічної системи нестійкі компоненти (моди) використовуються як параметри порядку;
- в нерівноважних процесах в результаті взаємодії між компонентами структури, наприклад, при просторово-часових кореляціях, виникають дисипативні структури;
- різні процеси обміну, взаємодії та самоорганізації визначаються залежностями між компонентами системи.

Вивчення БТП ставить складну задачу опису їх фазових портретів, які відображують широке різноманіття інваріантів різнорідних структур, що відповідають складній ієрархії регуляцій. Створюючи різні умови нерівноважності, шляхом комп'ютерного моделювання можна описати різні сценарії розвитку об'єктів. При цьому виділяються зовнішні та внутрішні регуляції. Зовнішні регуляції являють собою накачки та дисипацію речовин, наприклад, за рахунок гідролізу. Внутрішні регуляції приводять до самоорганізації підсистем в єдину систему, тобто в цьому випадку виявляються кооперативні властивості, які приводять до виникнення синергетичного ефекту. Моделі біотехнологічної системи у вигляді систем кінетичних рівнянь мають інваріанти, які виникають у фазовому портреті системи, зображують її адаптацію і мають складну ієрархію послідовного ускладнення розвитку об'єкта.

Використання синергетичного підходу при управлінні БТП дозволяє конструювати такі структури, в яких динамічні процеси базуються на організації та самоорганізації і повною мірою відповідають природі об'єкта та його динамічним властивостям. При цьому в системі управління узгоджено розв'язують принаймні дві взаємозв'язані задачі: знаходження таких дій, які переводять систему в новий стан у відповідності з поставленими вимогами, наприклад, швидкодії або витрат ресурсів; забезпечення самоорганізації, тобто знаходження такої структури, при якій система в процесі біфуркаційної нестійкості переходить в новий стан (стійкий) з мінімальним рівнем вільної енергії. Особливість синергетичного підходу полягає в тому, що оптимальною є така структура системи управління, в якій реалізуються процедури самоорганізації, а потрібний стан системи буде одним із стійких. Крім того, організовується рух у фазовому просторі в напрямку необхідної точки, а застосування самоорганізації та взаємодії в системах управління співпадає з адаптивним підходом до параметричного та структурного синтезу оптимальних систем.

БТП можна віднести до детермінованих систем з нерегулярною, хаотичною поведінкою, тобто це динамічні системи, математичні моделі яких характеризуються "надчутливістю" до початкових умов: навіть як завгодно близькі траєкторії з часом розходяться на кінцеву відстань, тобто прогноз траєкторії руху системи на тривалий час неможливий, але кожна траєкторія залишається обмеженою, що не відповідає уявленням щодо стійкості лінійних систем. Хаотичні системи мають суттєву особливість, пов'язану з можливостями значного змінювання їх властивостей за допомогою як завгодно малих змінювань параметрів, що може супроводжуватись перетворенням хаотичної траєкторії в періодичну і навпаки. Таким чином, при управлінні БТП виникає можливість уникнути інтенсивних змінювань матеріальних чи енергетичних потоків, тобто необхідно знайти і реалізувати цілеспрямовані впливи у вигляді малих змінювань параметрів.

Загальна задача синергетичного управління і самоорганізації формалізується так: для об'єкта, який описується рівнянням

$$\dot{X} = F(X, U, E, t) \quad (1)$$

необхідно знайти управління

$$\dot{U} = G(U, X, Z, C, S), \quad (2)$$

де: X - вектор станів об'єкта; $F(\cdot), G(\cdot)$ - нелінійні функції; C - параметр управління; S - параметр порядку; E - вектор випадкових збурень.

Для опису нелінійних динамічних систем, які функціонують в умовах випадкових збурень, можна використати дисипативне рівняння Ланжевена виду:

$$\dot{X}(t) = f(x, t) + g(x, t)E(t), \quad (3)$$

де: $f(\cdot), g(\cdot)$ - векторні детерміновані функції, причому $f(x, t)$ описує топологію фазового простору і визначає динамічні властивості системи. Друга складова характеризує характер взаємодії між детермінованою та стохастичною компонентами системи і відіграє важливу роль в нерівноважних та нестійких процесах, коли флуктуації допомагають системі знаходити стійкий стан рівноваги в нових умовах. Випадковий характер процесу проявляється в тому, що траєкторії руху системи є множинними, а взаємодія між детермінованими та стохастичними складовими в різних умовах (нерівноважність, нестійкість, неузгодженість) визначає процеси самоорганізації. Механізми самоорганізації і взаємодії, характерні для БТП, проявляються у виді: цілеспрямованого узгодження і координації дій елементів у колективній системі; упорядкування колективної поведінки за рахунок використання параметрів порядку, відношень та полів середовищ; введення вибіркової нестійкості в нерівноважних фазових переходах за схемою: біфуркація – нестійкість – хаос – впорядкована структура; конкуренція, конфлікти, конфронтація і

компроміси, консолідація; просторова та часова кореляція, синхронність і когерентність; флуктуація, мутація та відбір; семантичний зв'язок та асоціативна дія; генерація структур.

Компоненти управління повинні так взаємодіяти з компонентами об'єкта, щоб забезпечити рівноважний стан в заданій точці Z_0 . В умовах біфуркаційної нестійкості можуть виникати тимчасові структури у вигляді хаотичних процесів з областю притягування типу "дивного" атратора, який має дробову розмірність фракталу у фазовому просторі. В цьому випадку в динамічних нелінійних детермінованих системах вище другого порядку можуть виникати випадкові процеси, і тоді системи управління повинні мати можливість обирати співвідношення між сприяннями та протидіями в колективних процесах, підсилюючи або зменшуючи ефекти впливу різних частин. При цьому існує принципова можливість організувати контури не лише структурного, а і параметричного та координатного управління з компенсацією основних збурень.

Системи автоматизації біотехнологічних процесів, побудовані на сучасних технічних засобах, дозволяють забезпечувати ефективність роботи об'єктів в різних режимах, але при цьому необхідно враховувати, що, наприклад, задача стабілізації технологічного режиму передбачає подавлення хаотичних коливань або приведення їх до регулярних. Якщо об'єкт задано у формі:

$$\dot{X}(t) = F(X, U), \quad (4)$$

де: X - координати стану; U - сигнал управління, то задача стабілізації формулюється так:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (X(t) - X^*(t)) = 0, \quad (5)$$

або:
$$\lim_{t \rightarrow \infty} (Y(t) - Y^*(t)) = 0, \quad (6)$$

де: Y - вихід системи; а X^*, Y^* - задані значення координат стану або виходу, в тому числі періодичний рух. При повній спостережності системи $Y(t) \equiv X(t)$, задача стабілізації реалізується в розімкненій системі за оптимальною програмою або в замкненій за координатами стану чи вихідним сигналом.

Для БТП часто доцільним є генерування та підтримання хаотичних коливань як фактора інтенсифікації процесу, тоді траєкторія руху не визначається, а ставиться вимога відповідності формальному критерію хаотичності:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} G(X(t)) = G^*, \quad (7)$$

де: G^* - граничний показник функції мети $G(X)$.

При управлінні БТП може виникати також задача синхронізації як узгодженого змінювання станів та характеристик двох або більше систем. Якщо синхронізація не може виникнути без управління ($U = 0$), то необхідно обрати відповідний регулятор, а формально синхронний рух двох підсистем з координатами станів $X_1 \in R^n, X_2 \in R^n$ характеризується повним або частковим співпадінням векторів $X_1 = X_2$, а асимптотична синхронізація станів двох систем оцінюється так:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (X_1(t) - X_2(t)) = 0 \quad (8)$$

В задачах генерування та синхронізації коливань бажана поведінка систем однозначно не фіксована, а оцінки та характеристики задаються лише частково, наприклад амплітуда, а частота та форма можуть змінюватися в певних межах.

Управління БТП здійснюється, виходячи з вимог техніко-економічного характеру, тому застосовуються різні критерії оптимальності, які можна поділити на дві групи. До першої відносяться критерії, які безпосередньо оцінюють кількість отриманої біомаси та неутілізованого субстрату, собівартості біомаси та інш.

До другої групи відносяться критерії оптимальності, які характеризують якість управління БТП, а саме:

- максимальної швидкодії:

$$I_1 = \int_0^{t_n} 1 \cdot dt = t_n, \quad (9)$$

тобто мінімізації часу переходу t_n в область оптимального режиму;

- інтегрально-квадратичний:

$$I_2 = \Delta x^T(t_k) G \Delta x(t_k) + \int_{t_0}^{t_k} (\Delta x^T(t) P \Delta x(t) + \Delta U^T(t) D \Delta U(t)) dt, \quad (10)$$

де: $\Delta x(t), U(t)$ - відповідно змінювання регульованої координати та сигналу управління; G, P, D - вагові матриці відповідних розмірностей; t_0, t_k - інтервал управління. Цей критерій враховує відхилення реального стану від бажаного (перша складова) в кінцевий момент часу, на інтервалі $t_k - t_0$ (друга складова), мінімізацією енергетичних витрат (третя складова). Критерій використовується в задачі аналітичного конструювання регуляторів;

- H_2 -оптимального синтезу з нормою:

$$\|H\|_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \text{tr}[H^T(-jw)H(jw)] dw}, \quad (11)$$

де: $H(s), s = jw$ - передаточна функція системи за каналом "вхід - вихід", аналітична в правій півплощині ($\text{Re } s > 0$); $\text{tr}(\cdot)$ - слід матриці;

- H_∞ -оптимального синтезу з нормою:

$$\|H\|_\infty = \max_{w \in [0, \infty]} \sigma(w), \quad (12)$$

де: $\sigma(w)$ - максимальне сингулярне число матриці $H(jw)$ (корінь квадратний з максимального власного значення ермітової матриці $H(jw)^T H(jw)$).

Використання критеріїв (11), (12) орієнтовано на забезпечення мінімуму енергії похибки регулювання для складного об'єкта шляхом створення єдиного регулятора, який забезпечить робастне управління за умови, що властивості об'єкта постійно змінюються за рахунок внутрішніх процесів та взаємодії із зовнішнім середовищем.

Системна задача управління БТП орієнтована на реалізацію в рамках ієрархічної системи автоматизації.

The brought results of the system analysis biotechnological process as complex system, in which possible select the row a level with corresponding to detalization of the interaction separate component. It is shown that when making managerial system by main approach is an use principle of organization and adaptation (synergetic approach). Such systems use minimum in size signals of management, which translate the process in desired point.

1. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. - М.: Энергоатомиздат, 1994. - 343 с.

2. Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л. Управление хаосом: методы и приложения // Автоматика и телемеханика. - 2003, №5. - с. 3-45.

