

УПРАВЛЕНИЕ СТОХАСТИЧЕСКИМИ БИОИНЖЕНЕРНЫМИ СИСТЕМАМИ

С.И. Колесникова, А.А. Фоменкова

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67
E-mail: ksi@guap.ru*

Ключевые слова: нелинейный объект, стратегии управления, минимизирующие дисперсию выходной макропеременной, динамические стратегии определения макросостояния, киберфизическая биоинженерная система.

Аннотация: Рассматривается задача управления биоинженерным объектом с применением идеологии киберфизических систем. В структуру киберфизической системы включен аналитически сконструированный синергетический стохастический регулятор. В качестве апробации всех структурных и алгоритмических построений выбрана сложная система биологической очистки сточных вод на основе анаэробного биореактора, характеризующаяся большим количеством взаимосвязанных физических, технических и биохимических параметров. Результаты исследований использованы при разработке системы мониторинга, обладающей существенным сокращением времени обработки исторических данных и вычислительных ресурсов для промышленного биореактора.

1. Введение

Актуальность новых постановок задач управления для объектов биоинженерии [1-4], характеризующихся плохой формализуемостью, неполнотой информации о биохимических процессах, неустойчивостью предельных состояний, подтверждается отсутствием общего подхода к их моделированию и сопротивляемостью таких объектов к управлению. К причинам необходимости создания алгоритмов целенаправленного вмешательства в работу биоинженерной системы отнесем следующие:

- необходимость анализа и прогнозирования динамики биохимических процессов и проверки гипотез, которые трудно/невозможно воспроизвести в лабораториях;
- хаотичность объекта в определенных условиях; наличие уравнений «хищник-жертва», описывающих биопроецессы, придают объекту неустойчивые свойства;
- рассмотрение биоинженерных моделей как объектов оптимального контроля привело к некоторым успешным практическим решениям [1-3];
- математическое моделирование биоинженерных объектов основано на «подходящем» для управления аппарате - n -мерных системах ОДУ (разностных уравнений).

Здесь рассмотрим проблему управления системой анаэробной биологической очистки сточных вод (САБО).

2. Киберфизическая система управления САБО

2.1. Пример формализации задачи управления биореактором

Работа биореактора основана на способности микроорганизмов преобразовывать исходные органические компоненты субстрата в необходимый конечный продукт.

В общем случае, опуская особенности поэтапной переработки субстрата различными группами микроорганизмов биомассы, процесс биохимического преобразования можно представить как трофическую цепь: субстрат (S) \Rightarrow биомасса (B) \Rightarrow продукт (P).

Например, математическая модель биореактора со взвешенно-седиментированной биомассой [4] как объекта управления, в частности, может иметь вид:

$$(1) \quad \begin{aligned} \dot{\mathbf{X}} &= \mathbf{F}(\mathbf{X}) + \boldsymbol{\zeta}(t) + \mathbf{u}(t), \mathbf{u} = (0, \dots, 0, u_1, u_2)^T, \boldsymbol{\zeta} = (0, \dots, 0, \zeta_1, \zeta_2)^T, \mathbf{X}^0 = \mathbf{X}(0), \\ \mathbf{X} \in \mathbb{R}^7, \mathbf{X} &= (X_1, \dots, X_7)^T = (S, B_1, P, B_2, G, \theta, Q)^T, \mathbf{u}, \boldsymbol{\zeta}, \boldsymbol{\psi} \in \mathbb{R}^2, \boldsymbol{\psi}(t) = 0, t \rightarrow \infty. \end{aligned}$$

или в скалярной записи

$$\begin{aligned} \dot{S}(t) &= V^{-1}Q_{in}(t)(S_{in}(t) - S(t)) - r_{1S}(B_1, S, \mathbf{K}_1), \\ \dot{B}_1(t) &= -V^{-1}Q_{in}(t)B_1(t) + \mu_{\max 1}(S(t)B_1(t)/(K_{S1} + S(t) + K_{i1}^{-1}S(t)^2)) - k_{d1}B_1(t), \\ \dot{P}(t) &= -V^{-1}Q_{in}(t)P(t) - r_{1P}(B_2, P, \mathbf{K}_2) + r_{2P}(B_1, S, \mathbf{K}_1), \\ \dot{B}_2(t) &= -V^{-1}Q_{in}(t)B_2(t) + \mu_{\max 2}(P(t)B_2(t)/(K_{S2} + P(t) + K_{i2}^{-1}P(t)^2)) - k_{d2}B_2(t), \\ \dot{G}(t) &= -G(t) + r_{2G}(B_1, S_P, \mathbf{K}_1, B_2, P_P, \mathbf{K}_2), \\ \dot{\theta}(t) &= \zeta_1(t) + u_1(t), \dot{Q}(t) = \zeta_2(t) + u_2(t); \psi_i(\mathbf{X}(t)) = 0, t \rightarrow \infty, i = 1, 2. \end{aligned}$$

Здесь S – концентрация органических загрязнений, P, G, B_1, B_2 – концентрации промежуточных продуктов, биогаза, кислотогенов, метаногенов, соответственно; θ – температура, $\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_1$ – векторы параметров САБО, $r_{1S}, r_{1P}, r_{2P}, r_{2G}$ – функции, характеризующие биохимические процессы в биореакторе; $\zeta_1(t), \zeta_2(t)$ и $u_1(t), u_2(t)$ – неизвестные возмущения и функции управления, соответственно.

С позиции практической в фазовом пространстве динамической системы (1) выделяются подмножества $\Omega_i \in St, St = \{\Omega_i | i = \overline{1, N_\Omega}\}$ с характерными свойствами, позволяющими их различать друг от друга. Так, в работе [5] вводится понятие обобщенного состояния (рис. 1), выраженного интервальными ограничениями для векторов, компоненты которых содержат параметры САБО, наиболее интересные с эксплуатационной точки зрения.

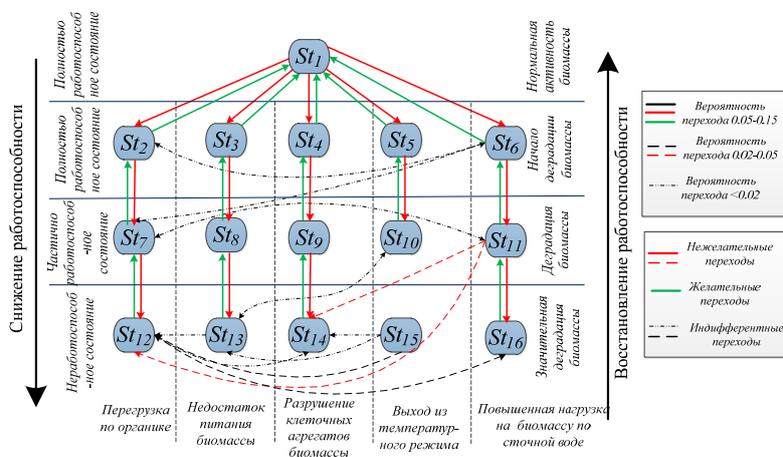


Рис. 1. Пример обобщенных состояний САБО, учитывающих степень деградации биомассы анаэробного биореактора.

Граф (рис. 1) моделирует обобщенные состояния САБО, располагая их в соответствии с уровнем работоспособности системы: от полностью работоспособного состояния St_1 на вершине графа до неработоспособных состояний $St_{12} \div St_{16}$. Пунктирными вертикальными линиями выделены обобщенные состояния, имеющие одинаковые причины потери работоспособности.

Под макросостоянием в рамках данной работы будем понимать заданное аналитически предельное равенство (многообразие [6]) $\boldsymbol{\psi}(\mathbf{x}) = 0, \mathbf{x} = \mathbf{x}(t), t \rightarrow \infty$, где $\boldsymbol{\psi}(\mathbf{x})$ -

заданная функция. Макросостояние должно обладать свойством асимптотической устойчивости. Примеры целевых макросостояний САБО [4]:

- минимум гидравлического времени $HRT = V/Q \rightarrow \min$ пребывания стока на очистке в сутки, где V – объем биореактора, Q – скорость разбавления, или скорость подачи стока в биореактор;
- степень очистки сточной воды (%) не ниже заданной

$$\eta = (1 - (S_{out} + P_{out})/S_{in})100\% \uparrow \eta^*, \eta^* \in [0.7; 0.9];$$
- максимум производительности системы по биогазу ($\text{м}^3\text{сут}$) и другие.

Понятие технического состояния, принятого в задачах диагностики, является наиболее общим случаем по отношению к макросостояниям.

2.2. Управление САБО как киберфизической системой

Рассмотрение САБО как киберфизической системы структурно может быть представлено в виде следующей схемы (рис. 2).

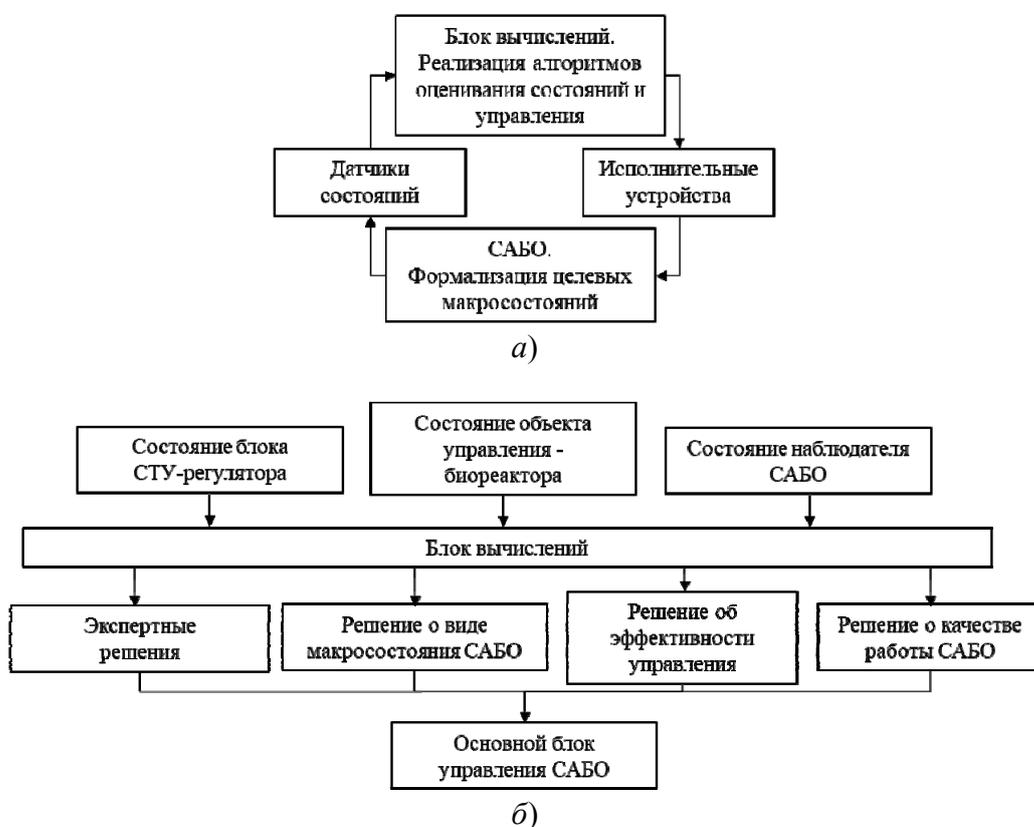


Рис. 2. САБО с позиции управления а) – основная структура; б) – блок вычислений киберфизической системы САБО.

Блок вычислений реализует комплекс алгоритмов, математический аппарат которых включает методы синергетической теории управления (рис. 3), машинного обучения, критериев и методов оценивания/прогнозирования состояний и алгоритмов подгонки параметров регулятора и наблюдателя состояний.



Рис. 3. Схема СТУ-управления переходами САБО от одного макросостояния к другому.

2.3. Алгоритм аналитического конструирования стохастического управления анаэробным биореактором

Предполагаются выполненными условия корректного применения СТУ и его методов - конструирования агрегированных регуляторов [6] и интегральной адаптации.

2.3.1. Основные положения алгоритма конструирования стохастического управления САБО. Для краткости перечислим принципиальные позиции вывода стохастического регулятора для биоинженерного объекта со случайными возмущениями по каналу управлений (см. в (1) два последних уравнения) без подробных пояснений.

Шаг 1. Формализуем задачу синтеза регулятора для (1) как задачу дискретного СТУ-управления в предположении выполнения соответствующих условий:

$$(2) \quad \begin{aligned} \mathbf{X}[k+1] &= \mathbf{H}(\mathbf{X}[k], \mathbf{u}[k], \xi[k], h) = \mathbf{X}[k] + h(\mathbf{F}[k] + \mathbf{u}[k] + \xi[k+1] + c\xi[k]), \\ \mathbf{X}[0] &= \mathbf{X}_0, k = 0, 1, 2, \dots \end{aligned}$$

Полагается, что $\mathbf{E}\{\xi_i[k]\} = 0$, $\mathbf{D}\{\xi_i[k]\} = \sigma^2$, $i = 1, 2$; $|c| < 1$. Ставится задача синтеза робастного управления, выводящего объект (2) в целевое множество $\mathbf{E}\{\Psi[k]\} = 0, k \rightarrow \infty$ и доставляющего минимум функционалу: $\Phi(\mathbf{u}) = \mathbf{E}(\sum_{k=0}^{\infty} \sum_{i=1}^2 (\alpha_i^2 \psi_i^2[k] + (\Delta\psi_i[k])^2))$.

Замечание 1. Переход к дискретному описанию связан с одной стороны, с целесообразностью введения параметра дискретизации в набор параметров регулятора в силу наличия неустойчивых режимов в описании (1) и (2); с другой стороны, с удобством аппарата вывода управления с учетом ограниченных случайных возмущений [7, 8].

Замечание 2. В силу необходимости выполняемой дискретизации при компьютерном моделировании, есть смысл сразу переходить к дискретному описанию, поскольку переносимость результатов между непрерывным и дискретным описаниями требует отдельного исследования (например, [9]).

Шаг 2. Осуществляем иерархический дискретный синтез синергетического векторного регулятора при фиксированных возмущениях согласно базовому методу конструирования агрегированных регуляторов [6], полученное управление обозначим:

$$\mathbf{u}^A[k] = \mathbf{U}(\mathbf{X}[k], \xi[k]), k = 0, 1, 2, \dots$$

Реализуемость этого шага обусловлена логикой СТУ при условии выполнения требований управляемости системы (2).

Шаг 3. Формируем управление как условное математическое ожидание:

$$\hat{\mathbf{u}}[k] = \mathbf{E}\{\mathbf{u}^A[k] | \xi^k\}, \xi^k = (\xi[0], \xi[1], \dots, \xi[k])^T, \xi[k] = (\xi_1(k), \xi_2(k))^T$$

Шаг 4. Из множества полученных СТУ-стратегий выбираем те, которые минимизируют дисперсию выходной макропеременной [8]:

$$(3) \quad \mathbf{u}^A[k] = \mathbf{U}(\mathbf{X}[k], \hat{\xi}[k]), \hat{\xi}[k] = h^{-1}(\Psi_1[k] + \lambda_1 \Psi_1[k-1]), |\lambda_1| < 1, k = 0, 1, 2, \dots$$

Утверждение. Если равенство $\psi(t) = \psi(\mathbf{X}(t)) = 0, t \rightarrow \infty$ определяет устойчивое макросостояние со свойством аттрактивности для объекта (2), то управление (3) обеспечивает перевод объекта (2) из начальной точки $\mathbf{X}(t_0) = \mathbf{X}_0$ в некоторую окрестность $\psi(\mathbf{X}(t)) = 0$ с минимальной дисперсией макропеременной $\psi(\mathbf{X}(t))$.

4. Заключение

Рассмотрена задача стохастического управления для биоинженерного объекта в рамках проектирования структуры киберфизической системы. Синергетический подход реализован заданием аналитического описания целевых макросостояний и выбором стратегий управления, минимизирующих дисперсию целевых макропеременных. Преимущество такого подхода к управлению позволяет выявление и изучение новых закономерностей изучаемого нелинейного объекта, повышает надежность прогностического анализа поведения моделируемого объекта при параметрических неточностях и случайных ошибках их оценивания на 15%-20% (по результатам имитационного моделирования САБО).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00336, <https://rscf.ru/project/23-29-00336/>.

Список литературы

1. Ghanavati M.A., Vafa Eh., Shahrokhi M. Control of an anaerobic bioreactor using a fuzzy supervisory controller // *Journal of Process Control*. 2021. Vol. 103. P. 87-99.
2. Petre E., Selişteanu D., Roman M. Advanced nonlinear control strategies for a fermentation bioreactor used for ethanol production // *Bioresource Technology*. 2021. Vol. 328. P. 124836.
3. Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л. Управление хаосом: методы и приложения. II. Приложения // *Автоматика и телемеханика*. 2004. № 5. С. 3-34.
4. Kolesnikova S.I., Fomenkova A.A. Dynamic strategies for control over the quality of monitoring of a complex bioengineering object // *Информационно-управляющие системы*. 2023. № 2. С. 51-60.
5. Фоменкова А.А., Ключарёв А.А. Математическая модель анаэробного биореактора с закрепленной биомассой как объекта управления // *Информационно управляющие системы*. 2019. № 2. С. 44-51.
6. Колесников А.А. Синергетика и проблемы теории управления: сборник научных трудов / Под ред. А.А. Колесникова. М.: Физматлит, 2004. 504 с.
7. Astrom K.J., Wittenmark B. Adaptive control. Нью-Йорк: Dover Publications, 2008. 590 p.
8. Kolesnikova S.I. Synthesis of Controller for Vector Plant, Based on Integral Adaptation Method for Disturbance Suppression // *Differential equations and control processes*. 2022. No. 3. P. 27-45.
9. Ljung L. Analysis of recursive stochastic algorithms // *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1977. Vol. AC-22, No. 4. P. 551-575.