

УДК 62-50:681.51

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМОМ АЭРАЦИИ В БИОРЕАКТОРЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

Лубенцов В.Ф., Шахрай Е.А., Лубенцова Е.В.

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», Краснодар,
e-mail: vf.lubentsov@yandex.ru

Проведено исследование САУ режимом аэрации в многорежимном биотехнологическом процессе с использованием нечеткой логики для коррекции параметров алгоритма управления. Использование треугольных функций принадлежности обеспечило применение несложных вычислительных процедур при проведении всех этапов нечеткого вывода. Применение логического вывода по алгоритму Мамдани обеспечило получение корректирующих воздействий на параметры алгоритма управления в виде конкретных численных значений, в отличие от их представления линейными функциями, характерного для нечеткого вывода Сугено. Результаты исследований показано, что использование нечеткого регулятора с аппроксимирующим управлением (РАУ) не требует определения моментов переключения законов управления при переходе от переходного режима к режиму стабилизации. Показатели качества переходных процессов получены для четырех исследуемых режимов функционирования процесса в биореакторе при существенной неустойчивости динамики канала управления концентрацией растворенного кислорода. Анализ результатов моделирования наглядно иллюстрирует, что при отсутствии нечеткой параметрической коррекции РАУ сохраняются колебания концентрации растворенного в ферментационной среде кислорода, а оптимальный режим аэрации в ходе многорежимного функционирования не обеспечивается. Для обеспечения показателей качества разработана многорежимная система управления на основе комбинации принципов аппроксимирующего управления и нечеткой коррекции параметров алгоритма управления. Эффективность разработанной САУ подтверждена полученными результатами исследования переходных процессов в переходных и установившихся режимах.

Ключевые слова: система управления, режим аэрации, нечеткий регулятор с аппроксимирующим управлением, концентрация растворенного кислорода, переходные процессы, показатели качества

INTELLIGENT AERATION CONTROL SYSTEM IN A BIOREACTOR OF PERIODIC ACTION

Lubentsov V.F., Shakhrai E.A., Lubentsova E.V.

Kuban State Technological University, Krasnodar, e-mail: vf.lubentsov@yandex.ru

The study of ACS with the aeration mode in a multi-mode biotechnological process using fuzzy logic to correct the parameters of the control algorithm was carried out. The use of triangular membership functions provided the use of simple computational procedures during all stages of fuzzy inference. The use of logical inference according to the Mamdani algorithm ensured the receipt of corrective effects on the parameters of the control algorithm in the form of specific numerical values, in contrast to their representation by linear functions, characteristic of Sugeno's fuzzy inference. The results of the research show that the use of a fuzzy controller with approximating control (CAC) does not require determining the switching moments of the control laws during the transition from the transient mode to the stabilization mode. The quality indicators of transients were obtained for the four investigated modes of operation of the process in the bioreactor with significant instability of the dynamics of the channel for controlling the concentration of dissolved oxygen. The analysis of the simulation results clearly illustrates that in the absence of a fuzzy parametric correction of the CAC, fluctuations in the concentration of oxygen dissolved in the fermentation medium remain, and the optimal aeration mode is not provided during multimode operation. To ensure quality indicators, a multi-mode control system has been developed based on a combination of the principles of approximating control and fuzzy correction of the control algorithm parameters. The effectiveness of the developed ACS is confirmed by the obtained results of the study of transient processes in transient and steady-state modes.

Keywords: control system, aeration mode, fuzzy controller with approximating control, dissolved oxygen concentration, transient processes, quality indicators

Применяемые на практике для крупнотоннажных производств биореакторы характеризуются большим геометрическим объемом (порядка 100–1000 м³), но относительно невысокой удельной производительностью процессов ферментации по целевому продукту и низким массообменом кислорода при больших мощностях предприятия в целом [1]. Имеющееся при этом различие в массообменных характери-

ках по зонам аппарата и проявление неидеальных по объему аппарата условий перемешивания оказывают влияние на качественное снабжение ферментационной среды кислородом. Устранение возникающих в таких условиях большого перерегулирования и длительных отклонений концентрации растворенного в ферментационной среде кислорода (pO_2) от оптимального значения с использованием подачи боль-

ших объемов воздуха на аэрацию не всегда эффективно. Процессы, протекающие в контуре подачи воздуха в аппараты, реализуются с помощью компрессоров, приводимых в действие асинхронными электродвигателями. Для регулирования скорости асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором применяют преобразователи частоты. На преобразователь частоты подается управляющий сигнал, который задает режимы работы электродвигателя и компрессора. Неэффективное управляющее воздействие может быть причиной автоколебательного режима работы компрессора и, как следствие, причиной колебаний давления и расхода воздуха. Такой режим приводит к завышенным объемам подаваемого воздуха и ведет к неоправданному перерасходу электроэнергии. Для устранения этого требуется применение эффективной системы автоматического управления (САУ) подачей аэрирующего воздуха, обрабатывающей переменные задающие воздействия и возмущения без существенных перерегулирований и максимальных динамических отклонений регулируемой переменной pO_2 с приемлемыми временем нарастания в переходном режиме и точностью в установившемся режиме. С учетом изложенного усовершенствование САУ режимом аэрации при реализации оптимальной программы подачи воздуха в аппарат является важной для аэробных процессов, основанных на микробиологическом синтезе, так как современные биотехнологии лежат в основе получения продукции пищевых, химико-фармацевтических и сельскохозяйственных производств. Многорежимность и неопределенность условий функционирования обуславливают необходимость решения задачи синтеза САУ с использованием методов интеллектуальной технологии, например нечеткой логики. Универсальные методы решения задач синтеза многорежимных систем управления процессами аэрации на основе методов нечеткой логики в настоящее время отсутствуют. Поэтому задача разработки и исследования интеллектуальной многорежимной системы управления режимом аэрации биотехно-

гическими объектами различного назначения является актуальной.

Целью исследования является повышение эффективности управления режимом аэрации с помощью разработки многорежимной системы управления на основе регулятора стабилизации расхода воздуха на аэрацию и регулятора концентрации растворенного кислорода с аппроксимирующим законом управления и коррекцией его параметров в переходном и установившемся режимах с помощью нечеткой логики.

Анализ особенностей структуры системы управления и методы исследования

Свойства процесса биосинтеза, протекающего в биореакторах периодического действия, таковы, что оптимальный режим аэрации, обеспечивающий необходимый уровень концентрации растворенного в среде кислорода, не может быть реализован подачей постоянного расхода воздуха в аппарат. Это подтверждается, с одной стороны, необходимостью реализации оптимального профиля расхода воздуха на аэрацию, а с другой стороны, обусловлено многорежимностью процесса [2]: наличием режима адаптации (режима приспособления культуры микроорганизмов к условиям среды после ее загрузки в аппарат), режима неустановившегося роста биомассы, режима интенсивного продуктообразования, режима стабилизации и замедления роста микроорганизмов. Характер этих режимов зависит от физиологического состояния микроорганизмов и различных факторов среды, среди которых одним из основных является концентрация растворенного кислорода. В связи с этим управление биореакторами, функционирующими в широком диапазоне переходных и установившихся режимов, требует многорежимных систем управления (МСУ) на основе автоматических регуляторов стабилизации воздуха с коррекцией по pO_2 различной сложности по структуре и алгоритму в зависимости от требования точности поддержания заданного режима. В данной работе в корректирующем контуре применен фаззи-регулятор с аппроксимирующим управлением (РАУ), имеющий уравнение вида [3]:

$$U(\varepsilon) = \left[\frac{M_1}{1 + \exp(-\lambda \cdot \varepsilon)} - \frac{M_1}{1 + \exp(\lambda \cdot \varepsilon)} \right] + \left[\frac{M_2}{1 + \exp[-\lambda \cdot (\varepsilon - a)]} - \frac{M_2}{1 + \exp[\lambda \cdot (\varepsilon + a)]} \right], \quad (1)$$

где M_1, M_2 – параметры настройки, определяющие величину корректирующего воздействия в зоне нечувствительности (ЗН) и за её пределами соответственно; ε – ошибка регулирования; λ – параметр настройки, определяющий наклон линейного участка аппроксимирующей характеристики; a – половина ЗН.

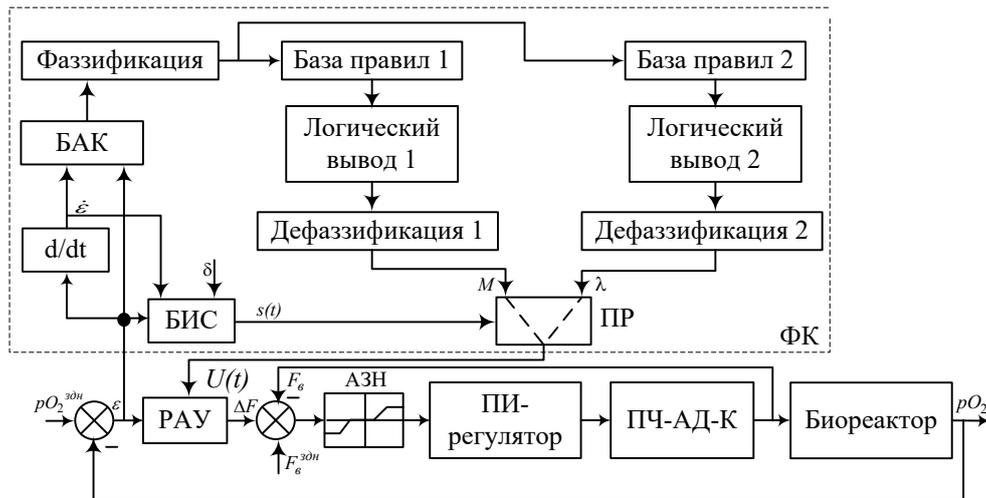


Рис. 1. САУ подачей воздуха на аэрацию с коррекцией по pO_2 ;

ФК – фаззи-корректор; РАУ – регулятор с аппроксимирующим управлением; БАЗ – блок анализа качества системы; ПР – переключающее реле; δ – сигнал, определяющий условие переключения ПР; АЗН – аппроксимированная зона нечувствительности; БИС – блок изменения структуры; ПЧ-АД-К – соответственно преобразователь частоты (ПЧ), асинхронный двигатель (АД), компрессор (К)

Структурная схема интеллектуальной САУ с нечеткой логикой представлена на рис. 1 [4].

В блоке изменения структуры (БИС) формируется командный сигнал, поступающий на вход переключающего реле (ПР), который изменяет структуру системы, подключая на вход РАУ воздействие $U_{\kappa}(t)$ с выхода фаззи-корректора (ФК) в соответствии с алгоритмом функционирования:

$$\begin{aligned} \text{если } S(t) > \delta, \text{ то } U_{\kappa 1}(t) &= M; \\ \text{если } S(t) < \delta, \text{ то } U_{\kappa 2}(t) &= \lambda, \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$S(t) = \varepsilon(t) + T_{об} \cdot \dot{\varepsilon}(t);$$

$\varepsilon(t)$, $\dot{\varepsilon}(t)$ – сигнал рассогласования и его производная; $T_{об}$ – постоянная времени хвостового участка переходной функции объекта; δ – положительный параметр, задающий размер «переходной» области от пускового (переходного) режима к установившемуся ($\delta = const$); $U_{\kappa 1}(t)$, $U_{\kappa 2}(t)$ – корректирующее воздействие первого и второго фаззи-блока соответственно; M , λ – параметры настройки РАУ; $M_1 = M$, $M_2 = \kappa \cdot M$, κ – коэффициент пропорциональности, задаваемый априори.

Приведенный алгоритм (2) функционирования БИС обеспечивает адаптацию управления к режимам функционирования в условиях неопределенности следующим образом: в контуре управления режимом аэрации воздействие внутреннего регулятора поступает на вход объекта, обеспечивая заданное значение расхода воздуха

на аэрацию. При изменении концентрации pO_2 на вход фаззи-корректоров поступает ошибка регулирования и ее производная. В соответствии с (2) формируется корректирующее воздействие на параметры РАУ, например $M_1 = M$, $M_2 = \kappa \cdot M$ при $\lambda = const$ в переходном режиме или $\lambda = var$ при $M = const$ в установившемся режиме. За счет этого реализуется поправка к задаваемому значению расхода воздуха на аэрацию, улучшая при этом динамику процесса в переходном и установившемся режимах.

Подача расхода воздуха осуществляется с помощью нечеткого корректирующего регулятора с аппроксимирующим управлением с коррекцией по pO_2 в биореакторе. Использование нечеткого регулятора дает возможность проектировать САУ, способные эффективно функционировать при наличии информации об объекте управления лишь качественного характера [5]. Вместе с тем, несмотря на интенсивные исследования в области применения методов нечеткой логики в системах управления, все еще остаются не полностью решенными многие проблемы, связанные с разработкой методики синтеза и анализа рассматриваемых многорежимных систем. В частности, в большинстве работ по управлению многорежимными системами не рассмотрена возможность применения регуляторов с аппроксимирующим управлением и построения нечетких регуляторов на их основе.

Типовыми режимами многих САУ являются установившиеся и переходные режи-

мы. В установившемся режиме всегда есть возмущения параметров ее режима, при которых она должна быть устойчива и обладать в достаточной мере помехозащищенностью. В переходном режиме основной задачей является обеспечение приемлемого времени нарастания и недопущение значительного перерегулирования и максимальных динамических отклонений при переходе к установившемуся режиму. С учетом этого исследование переходных процессов в МСУ проведено при различных внешних возмущениях. При этом учтено, что при изменении режима аэрации для оценки запаса устойчивости в системе при вариациях ее параметров, проводится анализ переходных процессов, когда возмущение воздействует на вход объекта. При анализе качества регулирования при изменении задающего воздействия на регулятор расхода воздуха на аэрацию и непредсказуемом действии внешних возмущений на входе объекта проводится анализ переходных процессов при одновременном действии этих воздействий. Для оценки качества регулирования в установившемся режиме проводится анализ переходных процессов, когда после вывода на режим возмущения действуют по каналу регулирования pO_2 в различные моменты времени.

С использованием интервалов квазистационарности процесса ферментации получены графики переходных процессов для четырех режимов функционирования системы:

режим 1 – вывод объекта на заданный режим с последующей стабилизацией pO_2 при ступенчатых изменениях сигнала задания регулятору расхода воздуха на аэрацию $F_{з\partialн} = 10$ м.е., сигнала задания по pO_2 корректирующего контура $pO_{2\partialн} = 5$ м.е. (м.е. – машинные единицы) и случайного сигнала помехи с нормальным распределением уровня сигнала, имеющего дисперсию $D = 0,01$ на входе регулятора расхода воздуха на аэрацию при $t = 0$;

режим 2 – стабилизация pO_2 при ступенчатых изменениях сигнала задания регулятору расхода воздуха на аэрацию $F_{з\partialн} = 13$ м.е., сигнала задания по pO_2 корректирующего контура $pO_{2\partialн} = 5$ м.е. (м.е. – машинные единицы) и сигнала помехи, имеющей дисперсию $D = 0,01$, на входе регулятора расхода воздуха на аэрацию при $150 \leq t < 300$ мин;

режим 3 – стабилизация pO_2 при ступенчатых изменениях сигнала задания регулятору расхода воздуха на аэрацию $F_{з\partialн} = 28$ м.е., сигнала задания по pO_2 корректирующего контура $pO_{2\partialн} = 5$ м.е. (м.е. – машинные единицы) и сигнала помехи,

имеющей дисперсию $D = 0,01$, на входе регулятора расхода воздуха на аэрацию при $300 \leq t < 550$ мин;

режим 4 – стабилизация pO_2 при ступенчатых изменениях сигнала задания регулятору расхода воздуха на аэрацию $F_{з\partialн} = 8$ м.е., сигнала задания по pO_2 корректирующего контура $pO_{2\partialн} = 5$ м.е. (м.е. – машинные единицы) и сигнала помехи, имеющей дисперсию $D = 0,01$, на входе регулятора расхода воздуха на аэрацию при $t = 550$ мин.

Изменение сигнала задания регулятору расхода воздуха на аэрацию осуществлено по закону

$$F_{з\partialн}(t) = \begin{cases} 10 \text{ нпу} & 0 \leq t < 150, \\ 13 \text{ нпу} & 150 \leq t < 300, \\ 28 \text{ нпу} & 300 \leq t < 550, \\ 8 \text{ нпу} & t \geq 550. \end{cases} \quad (3)$$

Заданное значение расхода воздуха на аэрацию в данной системе определяется выражением

$$F_{г}^{з\partialн} = F_{г}^{о\partialн} + \Delta F_{г},$$

где $F_{г}^{о\partialн}$ – задание оптимального расхода воздуха, определяемое как результат решения задачи оптимизации; $\Delta F_{г}$ – поправка расхода воздуха, формируемая фаззи-регулятором с аппроксимирующим управлением по результатам измерения отклонений содержания растворенного кислорода в среде культивирования.

Отклонение расхода воздуха, подаваемого в биореактор, с учетом содержания растворенного кислорода в среде определяется из выражения

$$\Delta F = F_{г}^{з\partialн} - F_{г},$$

где $F_{г}$ – текущее значение расхода воздуха на аэрацию.

Синтез регулятора с аппроксимирующим управлением (РАУ) в системе управления концентрацией pO_2 осуществлен с использованием модели объекта по каналу регулирования «расход воздуха на аэрацию – концентрация pO_2 » в следующем виде:

$$W(p, t) = \frac{k_{об}(t)^{t_i+T_i} e^{-\tau(t)^{t_i+T_i} \cdot p}}{T_2^2(t)^{t_i+T_i} \cdot p^2 + T_1(t)^{t_i+T_i} \cdot p + 1},$$

где $k_{об}(t)^{t_i+T_i}$ – коэффициент передачи объекта;

$T_1(t)^{t_i+T_i}$, $T_2(t)^{t_i+T_i}$ – постоянные времени объекта;

$e^{-\tau(t)^{t_i+T_i} \cdot p}$ – время запаздывания;

t_i – аргумент времени (независимая переменная);

p – комплексная переменная;

T_i – интервалы квазистационарности ($i = 1, 2, 3, 4, 5$), длительность которых достаточна для фаззи-коррекции параметров РАУ.

Наличие интервалов квазистационарности процесса позволило перейти от параметрических передаточных функций $W(p, t)$, в которых аргумент t рассматривается как параметр, к передаточным функциям $W_i(p)$ с постоянными коэффициентами для моментов времени t_i ($i = 1 \dots 5$) или для интервалов времени квазистационарности $[0 \dots T_i]$. Если параметры передаточной функции являются медленно меняющимися функциями в интервале времени, то можно считать параметры передаточной функции $W_i(p)$ постоянными в этом интервале и использовать ее для моделирования системы. Для такого случая модель можно записать в следующем виде:

$$W_i(p) = \frac{k_{oi} e^{-\tau p}}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}, (i = 1 \dots 5)$$

где k_{oi} – коэффициент передачи,

$$0,097 \leq k_{oi} \leq 0,275, \%/\text{м}^3/\text{ч};$$

$$[k_{oi}] = [\underline{k}_{oi}, \overline{k}_{oi}] = \text{mid}[k_{oi}] = (\underline{k}_{oi} + \overline{k}_{oi}) / 2 = (0,097 + 0,275) / 2 = 0,186 [\%/\text{м}^3/\text{ч}];$$

$$[\tau] = [\underline{\tau}, \overline{\tau}] = \text{mid}[\tau] = (\underline{\tau} + \overline{\tau}) / 2 = (2 + 5,7) / 2 = 4,0 \text{ мин};$$

$$[T_1] = [\underline{T}_1, \overline{T}_1] = \text{mid}[T_1] = (\underline{T}_1 + \overline{T}_1) / 2 = (7,83 + 14,8) / 2 = 11,3 \text{ мин};$$

$$[T_2] = [\underline{T}_2, \overline{T}_2] = \text{mid}[T_2] = (\underline{T}_2 + \overline{T}_2) / 2 = (4,61 + 10,08) / 2 = 7,34 \text{ мин},$$

где $\text{mid}[v_i]$ – среднее значение параметра модели объекта $[v_i]$, $i = 1, \dots, 4$.

Результаты исследования и их обсуждение

На основе результатов проведенных исследований установлено, что в САУ режимом аэрации целесообразно использовать типовой регулятор стабилизации расхода воздуха на аэрацию, а корректирующий регулятор по концентрации pO_2 в биореакторе (РАУ) рационально строить с использованием метода аппроксимирующих преобразований и коррекцией его параметров с помощью нечеткой логики. Для моделирования системы и проектирования фаззи-регулятора эффективно используются возможности среды моделирования MATLAB Simulink, а также пакет нечеткой логики Fuzzy Logic Toolbox [7]. Полученные переходные процессы в САУ с фаззи-

τ – запаздывание объекта, $2 \leq \tau \leq 5,7$, мин;

T_1, T_2 – постоянные времени объекта, $7,83 \leq T_1 \leq 14,8$, мин; $4,61 \leq T_2 \leq 10,08$, мин.

Используя граничные значения параметров модели, можно получить интервальную модель многорежимного объекта для анализа и синтеза многорежимной системы управления. Интервальная модель объекта по каналу «расход воздуха на аэрацию – концентрация pO_2 » реализована в следующем виде:

$$W(p) = \frac{[\underline{k}_{oi}, \overline{k}_{oi}] \cdot e^{-[\underline{\tau}, \overline{\tau}]p}}{[\underline{T}_2, \overline{T}_2]^2 p^2 + [\underline{T}_1, \overline{T}_1] p + 1},$$

где $\underline{k}_{oi}, \overline{k}_{oi}, \underline{T}_1, \overline{T}_1, \underline{T}_2, \overline{T}_2, \underline{\tau}, \overline{\tau}$ – нижняя и верхняя границы коэффициента передачи объекта k_{oi} , постоянной времени T_1, T_2 и запаздывания объекта τ соответственно.

При наличии интервальной модели, следуя [6], можно определить параметры номинальной (расчетной) модели для объекта с параметрической неопределенностью как модели, которая находится в центре множества. В этом случае значения параметров номинальной модели объекта рассчитываются как среднеинтервальные:

коррекцией коэффициентов M_1 и M_2 на интервалах квазистационарности процесса ($i = 1, 2, 3, 4, 5$), совмещенных с режимами – фазами физиологического развития микроорганизмов, представлены на рис. 2. Из рисунка видно, что использование РАУ с нечеткой коррекцией параметров закона управления не приводит к разрывным управлениям при смене режимов. Поверхность вывода корректирующего воздействия РАУ-регулятора представлена на рис. 2, е, из которого видно, что полученная трехмерная поверхность для нечеткого регулирования в переходном и установившемся режимах, содержащая значения переменных ε и $d\varepsilon/dt$ и корректируемого параметра M регулятора с аппроксимирующей функцией управления, является нелинейной.

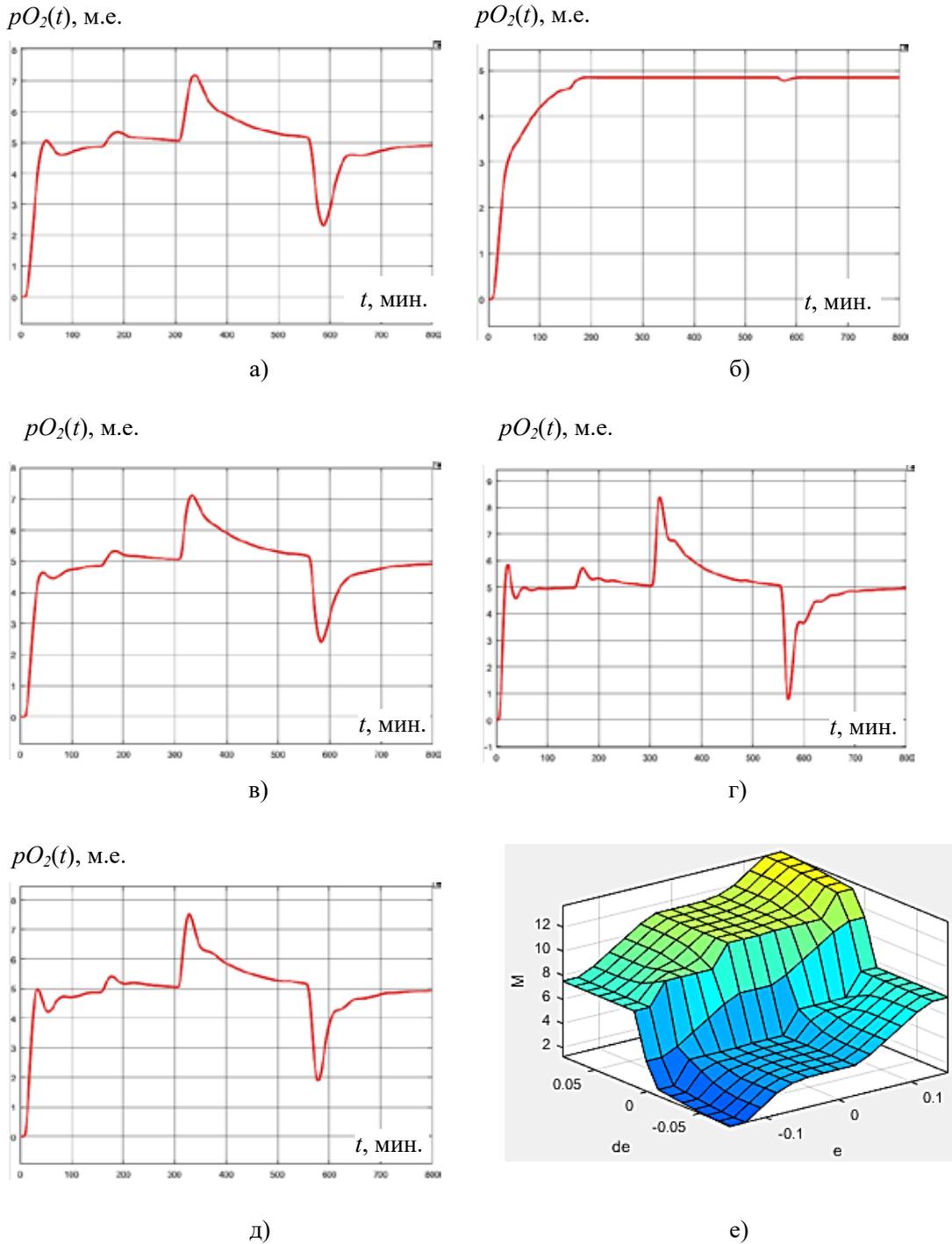


Рис. 2. Переходные процессы в САУ с фаззи-коррекцией коэффициентов M_1 и M_2 на интервалах квазистационарности – фазах процесса 1, 2, 3, 4 и 5 (а, б, в, г и д) соответственно и поверхность вывода корректирующего воздействия РАУ-регулятора (е)

Кривизна поверхности в области требуемых значений корректируемого параметра свидетельствует о значимости данного параметра для соответствующих режимов и достаточности выбранных

функций принадлежности, определяющих связь входных и выходных переменных с лингвистическими. Значения показателей качества переходных процессов приведены в таблице.

Показатели качества переходных процессов в исследуемых режимах
(при фаззи-коррекции / при отсутствии коррекции параметров)

Показатели качества переходного процесса	Режим 1	Режим 2	Режим 3	Режим 4
Режим (фаза) адаптации, интервал квазистационарности процесса $[0 \div 11,25]$ час, модель объекта $W_{M1}(p) = 0,167 \cdot \exp(-4,0p) / (101,53p^2 + 14,8p + 1)$, $\%/m^3/ч$				
Время нарастания T_n , мин	37,5*/28,75	—/—	—/—	—/—
Перерегулирование σ , %	—/18	—/—	—/—	—/—
Максимальное отклонение A_{max} , м. ед.	—/0,9	0,4/0,3*	2/1,8*	2,4/2*
Время переходного процесса T , мин	150/162,5	100/125	250/350	225/300
Режим (фаза) ускорения роста, интервал квазистационарности процесса $[11,25 \div 33,75]$ час, модель объекта $W_{M2}(p) = 0,097 \cdot \exp(-4p) / (56,28p^2 + 12,05p + 1)$, $\%/m^3/ч$				
Время нарастания T_n , мин	162,5*/250*	—/—	—/—	—/—
Перерегулирование σ , %	—/—	—/—	—/—	—/—
Максимальное отклонение A_{max} , м. ед.	—/—	0,18/0,3	1,27/1,0	1,45/1,6
Время переходного процесса T , мин	107,5/300	50/187,5	250/350	162,5/200
Режим (фаза) экспоненциального роста, интервал квазистационарности процесса $[33,75 \div 67,5]$ час, модель объекта $W_{M3}(p) = 0,162 \cdot \exp(-5,7p) / (49,08p^2 + 12,83p + 1)$, $\%/m^3/ч$				
Время нарастания T_n , мин	162,5*/26,3**	—/—	—/—	—/—
Перерегулирование σ , %	—/12	—/—	—/—	—/—
Максимальное отклонение A_{max} , м. ед.	—/0,6	0,18/0,2	2,0/1,8	2,5/2
Время переходного процесса T , мин	150/175	130/150	250/350	220/250
Режим (фаза) замедления роста, интервал квазистационарности процесса $[67,5 \div 118,75]$ час, модель объекта $W_{M4}(p) = 0,275 \cdot \exp(-2p) / (21,21p^2 + 7,83p + 1)$, $\%/m^3/ч$				
Время нарастания T_n , мин	12,5**/12,5	—/—	—/—	—/—
Перерегулирование σ , %	16/—	—/—	—/—	—/—
Максимальное отклонение A_{max} , м. ед.	0,2/3	0,75/1,7	3,2/2,2	4/3
Время переходного процесса T , мин	75/350	150/350	200/350	250/350
Режим (фаза) стационарного роста, интервал квазистационарности процесса $[118,75 \div 130,0]$ час, модель объекта $W_{M5}(p) = 0,179 \cdot \exp(-4,4p) / (42,83p^2 + 9,65p + 1)$, $\%/m^3/ч$				
Время нарастания T_n , мин	25*/18,75	—/—	—/—	—/—
Перерегулирование σ , %	—/26	—/—	—/—	—/—
Максимальное отклонение A_{max} , м. ед.	—/1,3	0,27/0,3	2,5/2	3/2,4
Время переходного процесса T , мин	140/250	150/125	250/300	200/300

Пр и м е ч а н и я : * – аperiodический характер переходного процесса;
** – колебательный характер переходного процесса.

Анализ показателей качества переходных процессов, приведенных в таблице, показал, что при фаззи-коррекции параметров M_1 и M_2 время нарастания в режиме 1 только для аperiodических переходных процессов незначительно превышает время нарастания в случае отсутствия коррекции. Максимальное динамическое от-

клонение в режиме 2 во всех интервалах квазистационарности при коррекции меньше в 1,1–2,3 раза. Время переходного процесса при фаззи-коррекции за исключением интервала (118,75–136) часов также меньше в 1,2–3,8 раза. В режиме 3 максимальное отклонение при фаззи-коррекции незначительно, в 1,1–1,5, превышает максимальное

динамическое отклонение A_{max} при отсутствии коррекции. В режиме 4 максимальное динамическое отклонение A_{max}^* при фаззи-коррекции в интервале (11,75–16,25) часов меньше в 1,1 раза, а при отсутствии фаззи-коррекции превышение незначительно и составляет в (1,2 – 1,3) раза больше. Во всех исследуемых интервалах время переходного процесса при фаззи-коррекции меньше в 1,1–4,7 раза.

Таким образом, с точки зрения быстроты действия в разных режимах функционирования целесообразным следует считать управление с использованием коррекции параметров M_1 , M_2 регулятора с аппроксимирующим управлением.

Заключение

Стремление к максимальному насыщению ферментационной среды кислородом за счет использования подачи воздуха на аэрацию приводит к неравномерному распределению концентрации растворенного кислорода в ферментационной среде. Результаты исследований показали, что обеспечение оптимальных условий насыщения среды кислородом возможно в многорежимной САУ подачей воздуха на аэрацию с коррекцией по концентрации растворенного кислорода в культуральной жидкости. Малое время нарастания в переходном (пусковом) режиме обеспечивается регулятором с аппроксимирующим управлением. При использовании данного регулятора упрощается процедура воздействия на параметры M_1 , M_2 ,

определяющие величину корректирующего воздействия в переходном режиме, исключая их избыточное влияние на качество переходных процессов в установившемся

режиме. Наиболее простым алгоритмом такой коррекции является алгоритм на основе нечеткой логики. В результате достигается повышение эффективности за счет разработки и внедрения интеллектуальной системы управления с учетом всех возможных режимов работы объекта. Подтверждением этому являются полученные в данной работе результаты исследования разработанной многорежимной системы управления на основе комбинации принципов аппроксимирующего управления и нечеткой коррекции параметров алгоритма управления.

Список литературы

1. Быков В.А. Процессы и аппараты биотехнологии: ферментационные аппараты: учебное пособие для вузов / Под ред. В.А. Быкова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Юрайт, 2019. 274 с.
2. Белокурова Е.С., Иванченко О.Б. Биотехнология продуктов растительного происхождения: учебное пособие. СПб.: Лань, 2022. 232 с.
3. Лубенцов В.Ф., Шахрай Е.А., Лубенцова Е.В. Реализация многорежимного управления с применением метода аппроксимирующих преобразований // Сборник научных статей X Международной научно-практической конференции молодых ученых, посвященной 59-й годовщине полета Ю.А. Гагарина в космос (Краснодар, 8–9 апреля 2020 г.). Краснодар: Издательский Дом – Юг, 2020. С. 352–354.
4. Lubentsov V.F., Shakhrai E.A., Lubentsova E.V. Modeling of automatic control system for air supply to a bioreactor using fuzzy control. Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2131 (2). No. 022009. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/2/022009.
5. Усков А.А. Системы с нечеткими моделями объектов управления: монография. Смоленск: Смоленский филиал АНО ВПО ЦС РФ «Российский университет кооперации», 2013. 153 с.
6. Торгашев А.Ю. Синтез систем управления для массообменных технологических процессов в условиях неопределенности: автореф. дис. ... докт. техн. наук. Москва, 2010. 44 с.
7. Штовба С.Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику. URL: <http://www.matlab.ru/fuzzylogic/book1/index.asp/> (дата обращения: 14.10.2021).