

УДК 681.5.01:658.512

Лубенцова Елена Валерьевна

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ПРОЦЕССОМ ФЕРМЕНТАЦИИ

В статье рассматривается разработанная гибридная интеллектуальная система для решения задач принятия управленческих решений. Для обучения нечетких нейронных систем использован гибридный метод, основанный на совместном использовании алгоритма обратного распространения ошибки (Back-propagation) и метода наименьших квадратов. Получены результаты моделирования нечеткой нейронной сети при помощи FlexTools и Fuzzy Logic Toolbox for MATLAB. Предложенный подход существенно повышает эффективность методологии построения интеллектуальных систем поддержки принятия решений при управлении слабоформализуемым процессом ферментации.

Ключевые слова: гибридная интеллектуальная система, нечеткая нейронная система, система поддержки принятия решений

Elena Lubentsova

INTELLECTUAL DECISION SUPPORT SYSTEM MAKING IN THE MANAGEMENT OF THE FERMENTATION PROCESS

The hybrid intellectual system is developed for solving problems of managerial decision-making. For training the fuzzy neural systems by using a hybrid method based on the joint use of the algorithm back-propagation (Back-propagation) and the least squares method. The obtained simulation results of fuzzy neural network using FlexTools and Fuzzy Logic Toolbox for MATLAB. The proposed approach significantly improves the efficiency of the methodology of intellectual systems for decision support in the management of poorly formalized process of fermentation.

Key words: hybrid intellectual system, fuzzy neural system, decision support system

В данной работе рассмотрена интеллектуальная система поддержки принятия решений при управлении технологическим процессом ферментации, основанная на применении нечёткой логики и искусственной нейронной сети [4–6]. Достоинством нечёткой логики является возможность использования экспертных знаний о структуре объекта в виде лингвистических высказываний: если <входы>, то <выход> [6]. Кроме того, нечёткие контроллеры могут работать с неполностью описанными системами с неизвестной динамикой, так как для них не требуется априорная математическая модель объекта управления. Однако аппарат нечёткой логики не содержит механизмов обучения. Результаты нечёткого логического вывода существенно зависят от вида функций принадлежности, формализующих нечёткие термы: низкая, высокая, холодный, горячий и т. п. Для того чтобы система управления могла обучаться на информации о действиях оператора и состоянии процесса ферментации, в настоящей работе предлагается подход к управлению процессом на основе адаптивной системы нейро-нечеткого вывода [8].

Первым этапом реализации данного подхода является задание обучающей выборки. С учетом особенностей процесса ферментации в производстве лекарственных препаратов в таблице 1 приведены возможные отклонения режимов накопления биомассы и синтеза целевого продукта от нормальных технологических режимов и способы их устранения. Акцент сделан на обработку информации, характеризующей интенсивность растворения кислорода и степень диспергирования углекислого газа. Это объясняется тем, что главным показателем массообменных характеристик ферментатора служит коэффициент массопередачи кислорода, так как кислород является основным лимитирующим фактором аэробных процессов ферментации.

Для оценки режимов процесса ферментации целесообразно учитывать разные этапы (фазы) одного и того же процесса, осуществляемые при различных оптимальных условиях по температуре, pO_2 и т. п. [7]. При этом биотехнологически ценные продукты синтезируются как в экспоненциальной фазе (нуклеотиды, многие ферменты, витамины – так называемые первичные метаболиты), так и в стационарной фазе роста (антибиотики, пигменты и т. п.) – так называемые вторичные метаболиты. Применение времени для разграничения этапов каждого из них приводит к тому, что в силу невысокой воспроизводимости процессов ферментации условия, оптимальные для одного режима, накладываются на другие. В этом случае снижается эффект от реализации оптимального технологического режима для каждого из этапов. В связи с этим для реализации принципа дифференцирования режимов, прежде всего, необходимо оперативно определять моменты переключения фаз (режимов), что можно осуществить, например, с помощью характерных изменений автоматически контролируемых параметров среды [7].

Таблица 1

**Возможные отклонения от нормального технологического режима
и способы их устранения**

Отклонение от нормального технологического режима	Возможные причины отклонения	Способы устранения отклонения и действия персонала
1. Уменьшилась концентрация и повысилась скорость изменения растворенного кислорода pO_2 в среде при постоянном расходе воздуха на аэрацию 4500 м ³ /ч	Увеличилась скорость поглощения кислорода, концентрация биомассы возрастает	1. Увеличить подачу воздуха на аэрацию
2. Увеличилась концентрация растворенного углекислого газа pCO_2 в среде, скорость изменения pO_2 при постоянном расходе воздуха на аэрацию 4500 м ³ /ч продолжает снижаться	Увеличилась интенсивность дыхания микроорганизмов, концентрация биомассы возросла, увеличилась вязкость среды в реакторе	1. Увеличить подачу воздуха на аэрацию
3. Существенно увеличилась температура в реакторе и резко повысилась скорость потребления O_2	Существенно увеличилась интенсивность дыхания микроорганизмов, интенсифицирован режим синтеза целевого продукта, возросло тепловыделение в реакторе	1. Существенно увеличить подачу воздуха на аэрацию 2. Увеличить подачу хладагента в рубашку реактора
4. При увеличенной подаче воздуха в реактор резко возросла температура, снизилась концентрация pO_2 , существенно увеличилась концентрация pCO_2 и концентрация CO_2 в отходящих газах	Существенно увеличилась интенсивность дыхания микроорганизмов, увеличилась вязкость среды в реакторе, что привело к образованию застойных зон в среде внутри реактора	1. Увеличить подачу воздуха на аэрацию до максимально возможной
5. Снизилась скорость потребления O_2 (близка к нулю), стабилизировалась концентрация pCO_2 , стабилизировалась температура в реакторе	Увеличение концентрации биомассы практически прекратилось и скорость накопления целевого продукта близка к нулю, тепловыделение прекратилось	1. Воздух подавать в минимальных количествах. 2. После снижения скорости изменения концентрация pO_2 до нуля прекратить подачу воздуха на аэрацию и остановить работу мешалки. 3. Осуществить максимальную подачу хладагента, реактор охладить до температуры 17-18 °С

Для примера на рис. 1 приведен вариант, когда скорость роста клеток не лимитируется концентрацией углеродного субстрата (он находится в избытке) и, следовательно, удельная скорость роста клеток будет определяться в основном содержанием в среде растворенного кислорода [2].

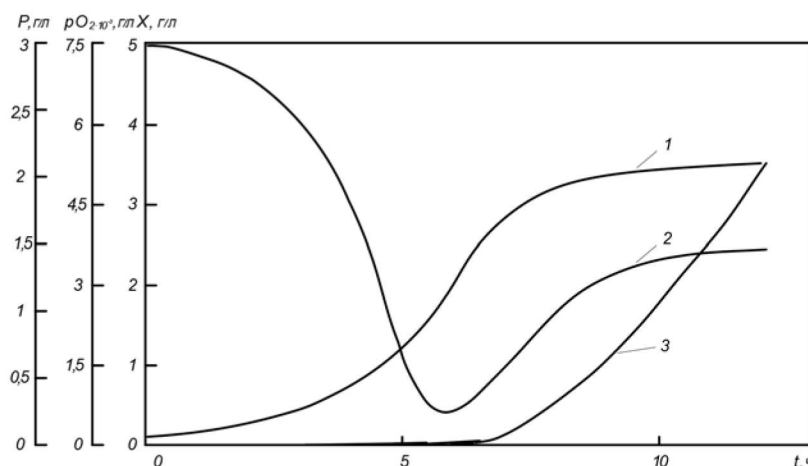


Рис. 1. График оперативного условного разграничения фаз по скорости изменения концентрации растворенного кислорода при периодическом культивировании штамма

E. coli – продуцента человеческого рекомбинантного $\alpha 2$ -интерферона:

1 – кривая роста клеток (X); 2 – кривая растворенного кислорода (pO_2);

3 – концентрация накопленного белка клетками (P) [2]

Так, при переходе культуры от лаг-фазы (фазы адаптации) к фазе экспоненциального роста скорость изменения концентрации растворенного кислорода $d(pO_2)/dt < 0$, а к фазе замедления $d(pO_2)/dt > 0$. Из вышеизложенного следует, что информативность концентрации pO_2 является достаточной, чтобы наряду с температурой процесса использовать концентрацию pO_2 о различных режимах в качестве входов нейросетевой модели для поддержки принятия решений по управлению процессом в целом.

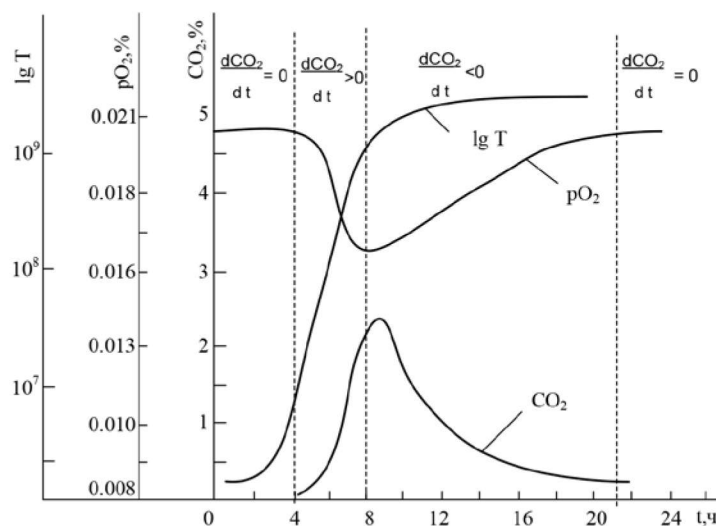


Рис. 2. График оперативного условного разграничения фаз

по скорости изменения концентрации углекислого газа в отходящем воздухе:

$\lg T$ – логарифм титра спор; pO_2 – концентрация растворенного кислорода;

CO_2 – концентрация углекислого газа в отходящем воздухе; $d(pCO_2)/dt$ – скорость изменения CO_2

При отсутствии паростерилизуемых датчиков концентрации pO_2 можно воспользоваться информацией о скорости изменения концентрации CO_2 в отходящем из аппарата воздухе, как это показано на рис. 2.

Для построения нейросетевой модели в соответствии с технологическими особенностями процесса можно сформировать две обучающие выборки, соответствующие каждому из режимов. Исследуемый процесс можно рассмотреть как объект вида

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (1)$$

где $x_1 \dots x_n$ – переменные состояния объекта; y – выходная переменная.

Для исследуемого объекта связь «входы x_i – выход y » можно представить в виде экспертной матрицы знаний. В таблицах 2 и 3 приведены матрицы знаний для режима роста биомассы и режима синтеза целевого продукта соответственно. Основным руководством при составлении экспертной матрицы знаний являлись технологические инструкции технологов-операторов цеха ферментации ОАО «Синтез», поэтому всем весам правил (субъективным мерам уверенности эксперта относительно высказываний) присвоена единица.

На начальном этапе построения системы поддержания принятия решений производится задание обучающей выборки. Перечень возможных отклонений от нормального технологического режима и методов их устранения приведен в таблице 1. Матрица знаний (табл. 2, 3) представляет собой векторы входных значений основных контролируемых параметров технологического процесса.

В таблице 2 значение графы <выход> «0» означает нормальное течение технологического процесса; значение «1» – уменьшение концентрации pO_2 ; значение «2» – существенное снижение концентрации pO_2 до значения, лимитирующего процесс роста; значение «3» – повышение концентрации pCO_2 до значения, ингибирующего синтез целевого продукта.

Таблица 2

Экспертная матрица знаний для режима роста биомассы

Номер правила	ЕСЛИ <входы>			ТО <выход>	Вес правила
	Концентрация pO_2 в режиме роста биомассы при $dpO_2/dt < 0$, $pO_2 \cdot 10^{-2}$ мг/л	Концентрация pO_2 в режиме синтеза продукта при $dpO_2/dt > 0$, $pO_2 \cdot 10^{-2}$ мг/л	Температура в реакторе, °C		
1	4	3.3	26	0	1
...	...	...	...	...	...
7	2	2	27	1	1
8	1.5	1.8	26.5	1	1
...	...	...	...	...	...
14	2	0.7	28	2	1
15	3	0.6	30	2	1
...	...	...	...	...	...
26	1.8	0.25	26	3	1
27	2	0.3	26.5	3	1

В таблице 3 значение графы <выход> «0» означает нормальное течение технологического процесса; значение «1» – в реакторе резко возрастает интенсивность дыхания микроорганизмов и повышается температура в реакторе; значение «2» – прекращение роста биомассы и снижение скорости накопления целевого продукта; значение «3» – прекращение подачи воздуха на аэрацию и снижение температуры в реакторе до значения, тормозящего нежелательные процессы, приводящие к дезактивации целевого продукта.

Таблица 3

Экспертная матрица знаний для режима синтеза целевого продукта

Номер правила	ЕСЛИ <входы>			ТО <выход>	Вес правила
	Концентрация pO_2 в режиме роста биомассы при $dpO_2/dt < 0$, $pO_2 \cdot 10^{-3}$ мг/л	Температура в реакторе, °C	Концентрация pO_2 в режиме синтеза продукта при $dpO_2/dt > 0$, $pO_2 \cdot 10^{-3}$ мг/л		
1	3.2	26	1.8	0	1
...	...	...	...	...	...
12	0.9	27	2.2	1	1
13	0.8	27	1.8	1	1
...	...	...	...	...	...
19	2.7	26	0.8	2	1
20	2.5	25	0.8	2	1
...	...	...	...	...	...
26	3.2	18	2	3	1
27	2.5	18	2	3	1

Используя приложение пакета MATLAB ANFISedit генерируем данные, соответствующие выборкам таблиц 2 и 3. Системой MATLAB в соответствии с введенными условиями и параметрами сформирована нейро-нечеткая сеть, которая имеет три входа, три внутренних слоя и один выход [1].

Для первого режима процесса первый вход – значение концентрации pO_2 в фазе роста биомассы, которая должна поддерживаться в пределах 1,7–4 мг/л; второй вход – значение концентрации pO_2 на этапе синтеза целевого продукта, которая должна поддерживаться в пределах 0,2–3,3 мг/л; третий вход – значение температуры, которая для оптимального протекания процесса должна поддерживаться в диапазоне 25,5–26,5 °C.

Принадлежность каждого точного значения к одному из термов лингвистической переменной определяется посредством функций принадлежности (ФП). Наиболее предпочтительными формами ФП являются треугольная и трапециевидная, поскольку нечеткий вывод значительно упрощается при использовании кусочно-линейных ФП. Для режима роста биомассы для каждого технологического параметра были выбраны трапециевидные функции принадлежности, а для режима синтеза целевого продукта – треугольные функции принадлежности. Посредством этих ФП входные величины фазифицируются, т. е. переходят из четкого значения в принадлежность нечеткого множества.

Алгоритмы нечеткого вывода различаются главным образом видом нечеткого вывода, следующим после фазификации, и разновидностью метода дефазификации. Наиболее распространенными алгоритмами являются алгоритмы Мамдани, Сугено, Ларсена, Цукамото [4]. Результаты сравнения данных алгоритмов применительно к задачам управления динамическими объектами говорят в пользу алгоритма Сугено, вследствие его меньшей вычислительной сложности, по сравнению с другими алгоритмами. Исходя из вышесказанного в данной задаче применим алгоритм нечеткого вывода Сугено.

Проведем обучение сети. Вначале обучим сеть при помощи алгоритма обратного распространения ошибки. После 3 000 эпох обучения получена ошибка обучения 0,0025214. После 140 эпох обучения сети гибридным методом получена ошибка обучения 0,0032832. Следовательно, гибридный метод осуществляет обучение сети за число эпох на порядок меньшее, чем алгоритм обратного распространения ошибки. Поэтому в дальнейшем будем использовать для обучения сети гибридный метод.

Моделирование процессов управления выполнено в среде MATLAB с пакетом расширения Fuzzy Logic Toolbox [3, 8]. Для настройки функций принадлежности использована технология ANFIS (Adaptive Network-based Fuzzy Inference System) [8]. Приложение пакета MATLAB ANFISedit позволяет сгенерировать данные из табл. 2 и 3.

Полученные результаты обучения нейро-нечёткой сети для режимов роста биомассы и биосинтеза целевого продукта представлены в виде диаграмм. На диаграммах входу под номером «1» соответствует значение концентрации pO_2 в режиме роста биомассы; входу под номером «2» – значение концентрации pO_2 в режиме синтеза продукта; входу под номером «3» – значение температуры в ферментаторе; выход – определяет состояние технологического процесса.

На рис. 3 представлены диаграммы, соответствующие нормальному течению технологического процесса. Значение концентрации pO_2 равно 3,5 мг/л (вход 1), значение концентрации pO_2 в режиме синтеза продукта равно 3,2 мг/л (вход 2), температура в реакторе равна 26,5 °С (вход 3). Выходное значение равное 0,000292 означает, что технологический процесс проходит без отклонений. Выходное значение, близкое к нулю, получается и при варьировании входных значений в пределах допустимых.

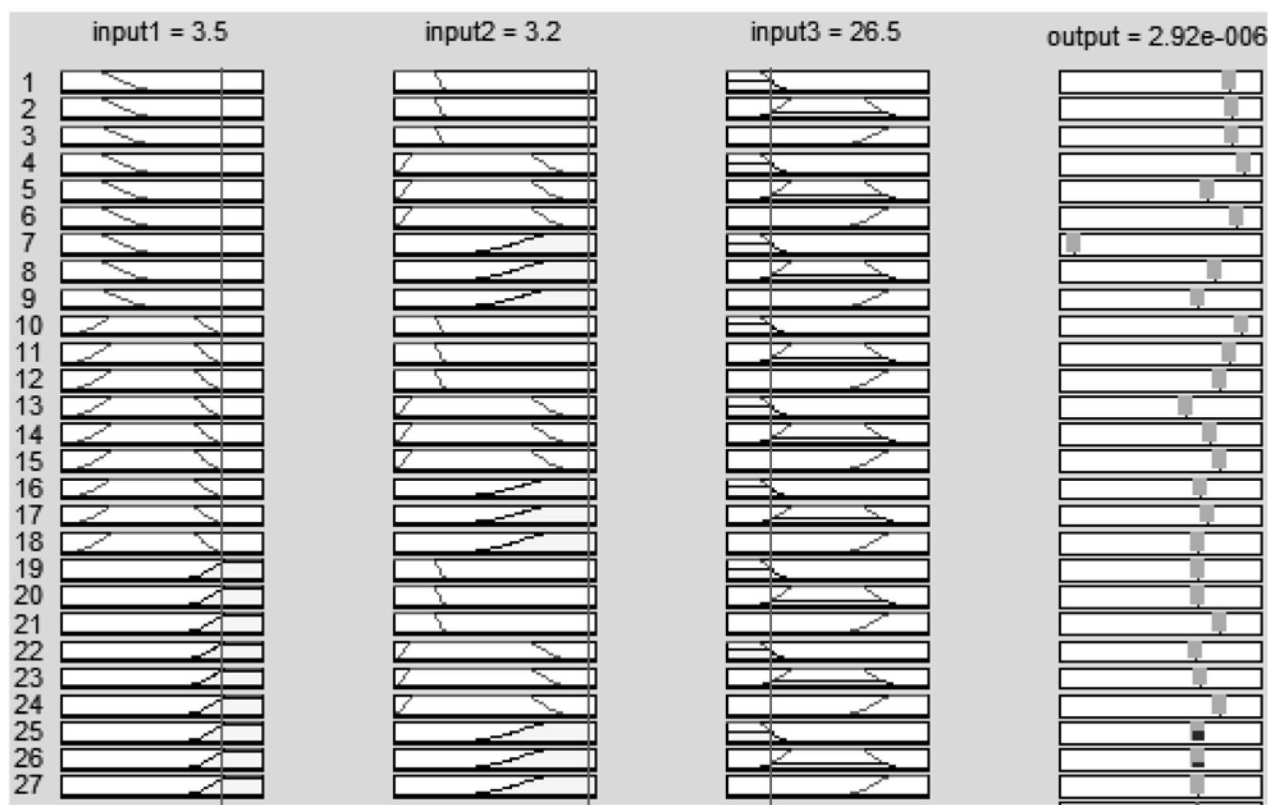


Рис. 3. Диаграммы для режима роста биомассы, соответствующие нормальному течению технологического процесса

На диаграммах для режима синтеза продукта входу «input1» соответствует значение концентрации pO_2 в режиме роста биомассы; входу «input2» – значение температура внутри реактора; входу «input3» – значение концентрации pO_2 в режиме синтеза; выход «output» – определяет состояние технологического процесса ферментации. Так, диаграммы рис. 4 для режима синтез соответствуют отклонению процесса по первому входу.

Значение концентрации pO_2 понизилось до 0,75 мг/л (input1), значение температуры среды в реакторе равно 26,5 °С (input2), значение концентрации pO_2 в режиме синтеза понизилось до 1,7 мг/л (input3). Выходное значение, равное 1, свидетельствует о недостаточной концентрации pO_2 для режима синтеза продукта. Системой будут поданы управляющие сигналы на увеличение подачи воздуха и на стабилизацию подачи охлаждающей воды.

Таким образом, рассмотренный подход к извлечению, представлению и обработке знаний, содержащих нечеткость, существенно повышает эффективность методологии автоматизированного построения интеллектуальных систем поддержки принятия решений при управлении слабоформализуемым процессом ферментации. Применяя пакет расширения FlexTool for MATLAB можно сгенерировать код микроконтроллера для реализации полученной гибридной сети.

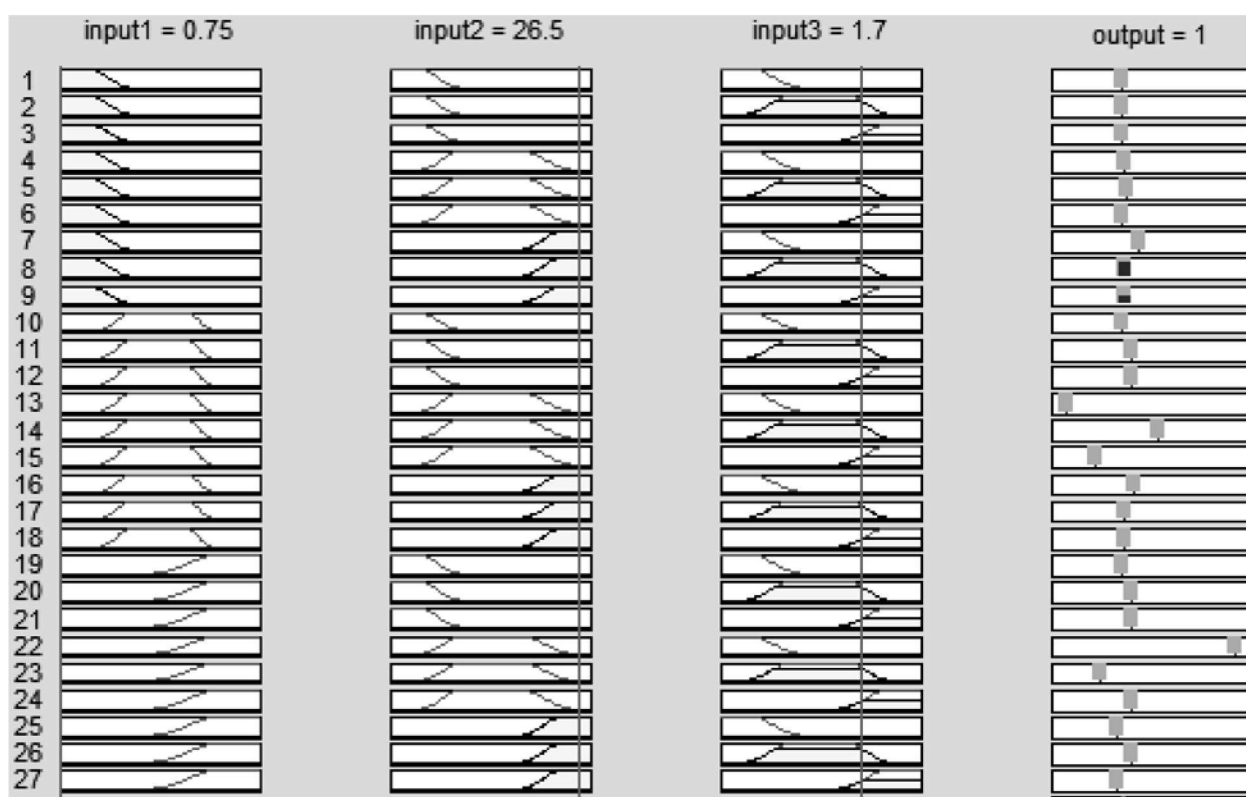


Рис. 4. Диаграммы для режима биосинтеза, соответствующие отклонению процесса по первому входу

Литература

1. Дьяконов В., Круглов В. Математические пакеты расширения MATLAB: специальный справочник. СПб.: Питер, 2001. 480 с.
2. Казеев И. В. Масштабирование процесса микробиологического синтеза рекомбинантных белков (на примере получения рекомбинантного человеческого $\alpha 2$ -интерферона): автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2009. 16 с.
3. MATLAB Fuzzy Logic Toolbox User's Guide // The MathWorks, Inc. 2008. 333 p.
4. Ротштейн А. П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткая логика, генетические алгоритмы, нейронные сети. Винница: УНИВЕРСУМ-Винница, 1999. 300 с.

5. Ротштейн А. П., Митюшкин Ю. И. Нейролингвистическая идентификация нелинейных зависимостей // Кибернетика и системный анализ. 2000. № 2. С. 37–44.
6. Сетлак Г. Интеллектуальная система поддержки принятия решений в нечеткой среде // Искусственный интеллект. 2002. № 3. С. 428–438.
7. Юсупбеков Н. Р. Управление процессами ферментации с применением микро-ЭВМ / Н. Р. Юсупбеков, А. В. Бабаянц, А. А. Мунгиев, Э. М. Якубович. Ташкент: Фан, 1987. 200 с.
8. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М.: Горячая линия-Телеком, 2007. 288 с.

УДК: 621.313.3

Романенко Ирина Геннадьевна, Юдина Ольга Ивановна

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИИ ЗУБЦОВОЙ ЗОНЫ СТАТОРА НА РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОГРУЖНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В работе представлены результаты расчета рабочих характеристик погружного асинхронного двигателя. Для их улучшения предложена коррекция геометрических размеров паза статора. Произведен анализ рабочих характеристик, полученных после коррекции зубцовой зоны.

Ключевые слова: погружной асинхронный двигатель, рабочие характеристики, поверочный расчет.

Irina Romanenko, Olga Yudina

THE ANALYSIS OF TOOTH AREA CONFIGURATION INFLUENCE ON WORKING CHARACTERISTICS OF IMMERSIBLE ASYNCHRONOUS MOTOR

The results of working characteristics of immersible asynchronous motor calculation were presented. Changing of stator slot geometry was proposed to improve working characteristics. The analysis of working characteristics, obtained after tooth area configuration changing, was produced.

Key words: immersible asynchronous motor, working characteristics, verifying calculation.

Погружные асинхронные двигатели нашли свое применение главным образом в качестве привода центробежных насосов для откачки пластовой жидкости из нефтяных скважин.

В отличие от остальных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором к погружным двигателям предъявляются более серьезные требования в плане выполнения изоляции и надежности работы, что обусловлено сильным химическим и температурным воздействием условий работы и откачиваемых жидкостей. Область применения погружных электродвигателей (ПЭД) определяет его конструктивные особенности: ПЭД представляет собой асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором, заполненный специальным маслом, со статором, выполненным в виде трубы, куда запрессован магнитопровод.

Специфичность конструкции ПЭД обуславливает наличие увеличенного воздушного зазора, вследствие чего возрастает намагничивающий ток, что ведет к снижению выходной мощности двигателя. Увеличение выходной мощности возможно путем увеличения габаритов машины. Однако актуальным является вопрос повышения эффективности использования двигателя, т. е. увеличения его выходной мощности при неизменных габаритах. Решением данной задачи может быть изменение геометрии зубцовой зоны статора.