

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ НЕПРЕРЫВНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ НА ОСНОВЕ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМНОЙ ДИНАМИКИ¹

Барышникова Е.С., Иващенко В.А.

Саратовский научный центр РАН, Саратов, Россия

baryshnikova@iptmuran.ru

Резчиков А.Ф.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия

rw4cy@mail.ru

Аннотация. Присущий крупным сложным предприятиям непрерывный характер производственной деятельности накладывает свои ограничения на систему управления таким предприятием. В статье в качестве примера непрерывного производства выбрано производство листового стекла. Современный способ производства листового стекла связан со значительными энергозатратами на запуск процесса, при этом результат управляющих воздействий проявляется с запаздыванием в связи с инерционностью протекающих процессов. Авторами в качестве модели управляющей системы выбрана нечеткая нейронная сеть, которая объединяет в себе как достоинства искусственных нейронных сетей, так и механизмы нечеткой логики. Для обучения сети используется гибридный алгоритм. Проектирование гибридной сети представляет постоянный процесс модификации и расширения структуры сети, что позволяет адаптировать модель под постоянно меняющиеся параметры производства, делая предлагаемую модель наиболее адаптируемой для поддержания стабильности работы сложных производств.

Ключевые слова: ситуационное управление, непрерывное производство, листовое стекло, системный анализ.

Введение

Для крупных сложных предприятий довольно часто присущ непрерывный характер производственной деятельности [1]. Это характерно для сложных химических производств, для производств, у которых пусковой режим связан со значительными энергозатратами.

При этом сложность протекающих технологических процессов такова, что трудно получить полное формализованное описание классическими способами. Еще сложнее потом на основе построенной классической модели проводить управление в режиме реального времени [2].

Также критерии управления как правило обладают нечетким характером и порой алгоритм управления представлен в виде экспертных рекомендаций на естественном языке.

В крупных сложных системах в контуре управления всегда предполагается наличие лиц, принимающих решение, которые обладают определенной свободой при принятии решений и выборе действий при функционировании объекта.

Основная задача при управлении непрерывным производством – не допустить остановки технологического процесса при сохранении необходимого уровня качества выпускаемой продукции.

При проектировании задается уровень качества выпускаемого продукта в виде совокупности требуемых свойств. В процессе же производства необходимо поддерживать заданные значения характеристики продукции, не допуская прерывания технологического процесса [3]. Параметры технологического процесса и качество продукции тесно связаны. Построение модели взаимосвязи характеристик качества продукции и параметров производственного процесса способствует повышению эффективности производства и дает возможность прогнозирования и предупреждения выпуска дефектной продукции. Для непрерывных производств построение подобных моделей, позволяющих прогнозировать качество выпускаемого продукта и принимать предупреждающие воздействия является эффективным способом повышения рентабельности предприятия.

Таким образом можно сделать заключение, что необходимая система управления должна обладать гибкостью к изменяющимся структуре и режиму функционирования объекта, учитывать нечеткость критериев управления и уметь работать с алгоритмами, заданными на естественном языке. Данную задачу можно решить, используя современные методы на основе механизмов искусственного интеллекта и нечеткой математики. Оба эти подхода успешно сочетаются в аппарате гибридных нейронных сетей. Нечеткая логика решает проблему описания системы на естественном языке, а искусственные нейронные сети добавляют гибкости проектируемой системе из-за эффективных

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема №125031703768-9 Математические модели и методы подталкивания сложных систем при управлении в условиях критических комбинаций событий).

механизмов обучения. Самое проектирование гибридных сетей уже включает в себя алгоритм обучения, что позволяет создать начальную систему, используя неполную информацию об объекте и в дальнейшем в процессе функционирования сети происходит ее модификация и расширение.

1. Описание непрерывного производства на примере стекольного предприятия

Ярким примером непрерывного производства может служить производство листового стекла. Множество параметров и сложные взаимосвязи протекающих в объекте процессов, необходимость поддержания стабильности процесса, прогнозирование качества выпускаемого стекла – все это усложняет задачу построения системы управления.

Непрерывность и инерционность технологического процесса приводит к тому, что на качестве выходной продукции сказываются процессы, протекающие задолго до появления первых изменений в характеристиках стекла. А сложность моделей взаимосвязей приводит к тому, что прогнозирующая система должна обладать способностью гибкой настройки параметров управления.

Рассмотрим сам технологический процесс производства листового стекла. На первом этапе из исходного сырья – шихты – и стеклянного лома при температуре порядка 1500–1600°C происходит образование жидкой массы стекла, на этом этапе в специальной стекловаренной печи протекают сложные химические процессы, влияющие на качественные характеристики выпускаемого стекла.

Полученная вязкая масса по специальному каналу вытекает на расплав металла (ванна расплава) и образует ровную лужу. Суть флоат-процесса в том, что за счет поверхностного натяжения и взаимодействия с поверхностью расплава образуется ровный лист стекла (рисунок 1) [4].

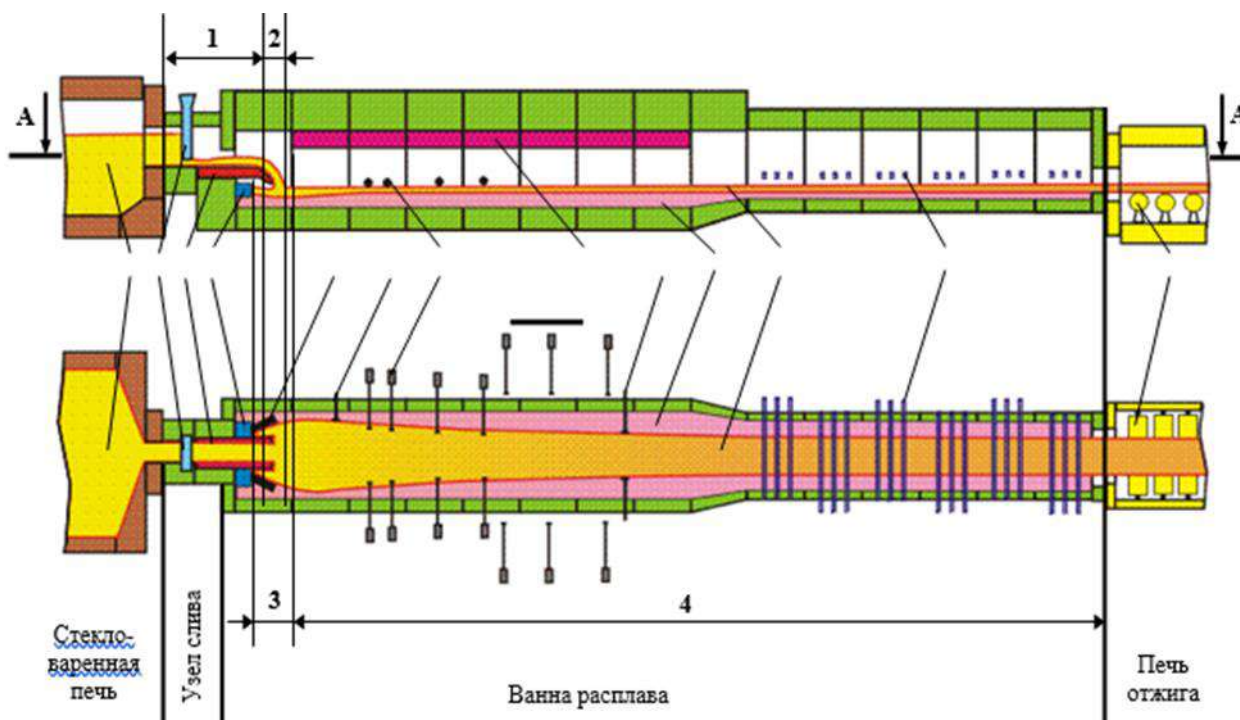


Рис. 1. Флоат-процесс

После ванны расплава для снятия остаточного напряжения и охлаждения лента стекла попадает в печь отжига. Печь для отжига стекла выполняет критически важную роль: она "успокаивает" материал, снимая внутренние напряжения, появившиеся в процессе его создания. Благодаря точному управлению температурным режимом при нагреве и охлаждении, стекло становится более выносливым и менее подверженным разрушению от внешних воздействий. Печь создает идеальные условия для равномерного прогрева всего изделия и последовательного снижения температуры в разных его частях, тем самым оберегая его от возникновения новых внутренних напряжений.

На конечном этапе происходит резка и контроль качества стекла. Край ленты стекла, который находился под растягивающими устройствами, идет в стеклянный лом.

Стоит отметить, что стеклянный лом необходим при производстве листового стекла, так как помимо того, что снижает температуру плавления шихты, еще и повышает однородность стекла, снижает появление включений, пузырьков и прочих дефектов, повышает прочность и устойчивость к воздействиям окружающей среды

2. Постановка задачи разработки модели и выбора метода управления флот-процессом

Мы провели анализ ситуаций, которые приводят к возникновению крупного брака или к остановке производственной линии. Собранное экспертное описание представляет собой набор неструктурированных данных на естественном языке.

Для анализа полученных сведений был выбран аппарат таблиц решений, что позволило получить общую картину собранной информации. Однако этот подход оказался недостаточно гибким: при появлении новых, существенно отличающихся ситуаций требовалась полная переработка структуры таблицы. Несмотря на это, таблицы решений стали ценным инструментом для формализации и структурирования накопленного экспертного опыта.

Было построено $S = \{s_1(t), s_2(t), \dots, s_n(t)\}$ – множество ситуаций, каждая из которых описывается уникальным набором признаков $P = (p_1, p_2, \dots, p_m)$. Значения этих признаков ситуаций образуют множество значений $A = \{a_1, a_2, \dots, a_k\}$. Текущая ситуация $s_i(t)$ определяется уникальным набором признаков (p_j), которые принимают значения из множества A .

Если не предпринимать никаких воздействующих управлений текущая ситуация $s_i(t)$ перейдет в ситуацию $s_k(t)$. Для всех ситуаций определен набор управлений $U = (u_1, u_2, \dots, u_l)$ из множества управляющих воздействий $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_w\}$, которые рекомендовано применить для поддержания стабильности технологического процесса.

Для корректной оценки процесса, протекающего в ванне расплава и влияющего на состояние ленты стекла, важны следующие параметры: скорость продвижения ленты, скорости растягивающих устройств, выбранная толщина стекла, температура в ванне расплава и давление защитной атмосферы. Управление этими параметрами осуществляется оператором флот-ванны.

Собранные ситуации были разбиты на классы, в соответствии с пониманием процесса стабилизации производства на аварийные, предаварийные и штатные. Штатные ситуации – это нормативный режим протекания технологического процесса в соответствии с заданным режимом выпуска.

Предаварийные ситуации – это такие ситуации, у которых соответствующая текущей ситуации $s_i(t)$ конечная ситуация $s_k(t)$ будет либо остановкой производства, либо выпуском продукции ненадлежащего качества.

Аварийными ситуациями будем считать собственно остановку производства или выпуск бракованного продукта.

Необходимо разработать описание объекта управления, которое обеспечивало бы возможность в реальном времени анализировать текущее состояние на производстве, оценивать степень угрозы аварийной ситуации и выбирать наиболее эффективные управляющие действия для возвращения процесса в нормальный режим.

3. Пример решения задачи

Одним из перспективных способов решения задач управления сложными объектами является ситуационное управление, опирающееся на создание специализированного языка для описания протекающих на объекте управления процессов. А управление понимается как процесс перевода одной ситуации, описанной в терминах созданного языка в другую.

При формировании ситуационного языка на основе экспертных данных о производстве на естественном языке определяются части создаваемого языка, выделяются основные понятия и термины [5].

По сути, ситуационное управление основывается на нечетком лингвистическом описании ситуаций, при этом само описание должно помогать быстрой классификации ситуаций. Построенные на предварительном этапе таблицы решений как раз позволили более четко определить необходимые в разрабатываемом языке понятия признаков ситуаций и сформировать векторы признаков. Это и есть подготовительный этап формирования системы управления. При этом по имеющимся экспертным данным необходимо каждой ситуации поставить в соответствие конечную ситуацию и вектор управляющих воздействий, позволяющих стабилизировать процесс производства.

В процессе функционирования система должна будет самостоятельно определять ближайший класс для текущей на объекте ситуации, для чего необходимо ввести меру близости ситуаций, при этом в процессе обучения системы возможно уточнение этой меры. Классы ситуаций будут представлять собой наборы ситуаций, с совпадающей конечной ситуацией и соответственно сходными векторами управляющих воздействий.

Определение того или иного признака можно построить с использованием аппарата нечеткой логики на основе функций принадлежности. Полученные значения функций принадлежности используем для вычисления меры истинности принадлежности ситуации тому или иному классу.

В качестве примера ситуационного управления можно рассматривать гибридную нейронную сеть, которая основана на актуальных концепциях искусственных нейронных сетей и аппарате нечеткой математики.

Основной состав сети состоит из трех слоев: вход, обработка информации (скрытый) и выход (рисунок 2).

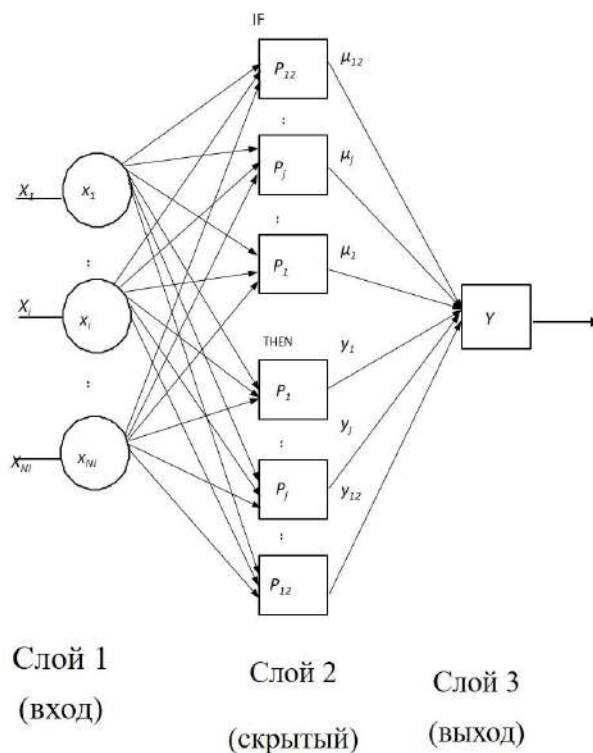


Рис. 2. Нечеткая нейронная сеть

На вход сети поступают данные от системы контроля за лентой стекла, такие как температура, давление защитной атмосферы, местоположение стеклянной лужи, положение растягивающего устройства и другие. Здесь необходимо данные датчиков преобразовать к единому формату для удобства дальнейших вычислений [6].

На внутреннем слое происходит анализ полученной от датчиков информации путем определения значений функций принадлежности входящих в систему лингвистических переменных. С помощью лингвистических переменных описаны признаки ситуации, а их комбинации позволяют определить класс ситуаций. В качестве единой формы функций принадлежности мы выбрали трапециевидные функции принадлежности, что упрощает дальнейшие вычисления без потери точности (см. рисунок 3).

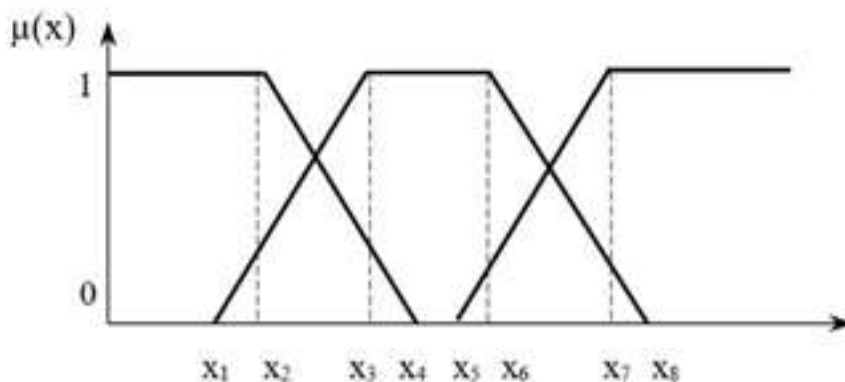


Рис. 3. Вид функций принадлежности входных лингвистических переменных

Комбинации лингвистических переменных позволяют нам определить наличие или отсутствие определенного признака ситуации. При этом возможно использование не только текущих значений с датчиков, но и значений на нескольких предыдущих этапах, в связи с чем в системе необходимо наличие базы ретроспективных данных. С использованием значений функций принадлежности определяем степень наличия того или иного признака. И на основе полученных степеней наличия классифицируем текущую ситуацию на объекте, вычисляя ее степень истинности с учетом весом значимости признаков, определяемых в процессе обучения сети

$$y_i(x) = \frac{\sum_{j=1}^J w_j z_j}{\sum_{j=1}^J w_j},$$

где y_i – степень истинности i -й аварийной ситуации, а w_j – вес значимости j -го признака ситуации, $i=1, \dots, I, j=1, \dots, J$.

По итогам работы гибридной сети мы определяем степень истинности ситуации, получаем набор значений истинности принадлежности ситуации к различным классам и если пройдет некий порог истинности, то ситуация считается принадлежащей определенному классу, которому соответствует единый вектор управляющих воздействий. Если ситуация близка к нескольким классам, то эксперт относит ее к какому-то из выбранных и по результатам управления определяется, верна ли была экспертная оценка, вносятся изменения в веса значимости признаков.

При этом создание нейронной сети происходит путем постепенного добавления ситуаций и расширения нейронов в каждом их слоев сети. Сначала строим сеть для одной ситуации, далее рассматриваем следующую, расширяя нейронные слои. Для корректировки созданной нейронной сети каждый раз возвращаемся и проверяем верность определения предыдущих ситуаций (рисунок 4).

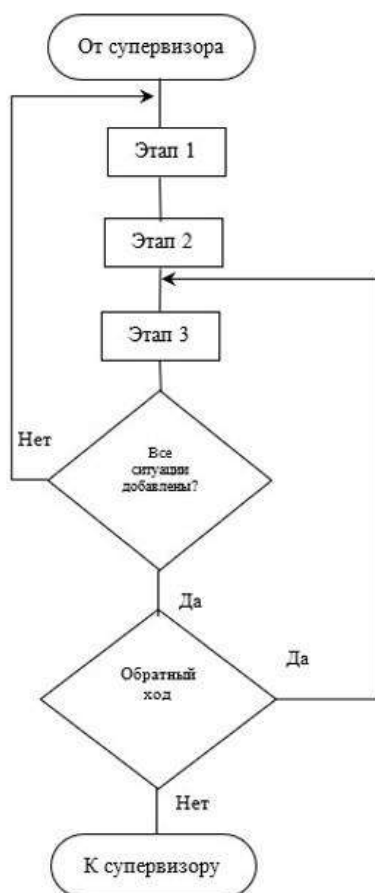


Рис. 4. Алгоритм обучения нечеткой нейронной сети

4. Заключение

В качестве примера непрерывного производства был выбран сложный и энергоемкий технологический процесс производства листового стекла. Собраны экспертные данные о структуре и

функционировании объекта, определены признаки ситуаций, выделены классы ситуаций и необходимые для каждого класса управляющие воздействия [7].

Предложена модель гибридной нейронной сети в качестве реализации ситуационного подхода к управлению сложным производством, определена структура и состав слоев гибридной сети. В качестве классифицирующей метрики предложена функция истинности принадлежности ситуации к заданному классу.

В настоящее время осуществляется наполнение нечеткой нейронной сети и ее апробация на реально действующем производстве в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, выполняемого ИПТМУ РАН.

Литература

1. Akberdina V.V., Shorikov A.F. Managing industrial complexes: A hierarchical agent-oriented model // *Upravlenets (The Manager)*, 2022. – Vol. 13, № 6. – P. 2–14.
2. Belostotsky M.A., Kunlin L., Korolenok A.M., Korolenok V.A. Formation of intelligent repair management system on the linear part of main oil pipelines // *Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*. – 2022. – Vol. 12(4). – P. 368–375.
3. Koval N.A. Neural network modeling of the technological process // *AIP Conf. Proc.*, 2023. – 2700 (1): 040059.
4. Петров Д.Ю. Архитектура информационной системы управления жизненным циклом цифрового двойника для непрерывного производства // *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)*, 2021. – № 57. – С. 98–04.
5. Baryshnikova E., Ivashchenko V., Lugovoj N., Rezchikov A. The Problem of Situational Control of Continuous Production. // *2022 15th International Conference Management of large-scale system development (MLSD)*. – 2022. – P. 1–4.
6. Massel L., Kuzmin V. Situation Calculus Application in Tasks of Intelligent Decision-Making Support // *2018 3rd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC)*. – 2018. – P. 1–4.
7. Kushnikov V.A., Bogomolov A.S., Ivashenko V.A., Selyutin A.D., Rezchikov A.F., Kushnikova E.V., Markov A.I. The Problem of Production Situations Identification in the Systems of Production Processes Management of an Aircraft Repair Enterprise // *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. – 2023. – Vol. 24(9). – P. 451–461.