

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ НЕПРЕРЫВНЫХ ПРОИЗВОДСТВ НА ПРИМЕРЕ ПРОИЗВОДСТВА ЛИСТОВОГО СТЕКЛА ¹

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. Рассматривается процесс управления непрерывным производством на примере технологического процесса производства флоат-стекла. Выполнен анализ процесса формования листового стекла, выделены основные этапы, описаны входные и выходные параметры. Предложена модель ситуационного управления для управления флоат-процессом.

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

Введение

В классической теории принятия решений управление рассматривается как решение задачи оптимизации целевой функции при условии ограничений. При постановке конкретной задачи управления объект управления и происходящие в нем процессы, которые мы принимаем во внимание, должны быть описаны в виде конкретных уравнений или систем уравнений. При этом для крупных систем размерность такого описания становится настолько большой, что приводит к невозможности эффективно решить полученную оптимизационную задачу с необходимой скоростью [1].

Полное и достоверное описание больших систем в качестве объектов управления не всегда возможно получить классическими методами. В сложных системах структура объекта и процесс его функционирования не являются постоянными [2]. Довольно сложно предугадать возможные изменения в функционировании объекта и в его структуре. Закономерный вывод заключается в том, что помимо требуемой точности описания объекта, скорости производимых вычислений, необходима еще и гибкость в предлагаемом методе управления.

Также описание больших систем невозможно представить с помощью четких критериев. То есть процесс управления должен предполагать нечеткость, размытость критериев управления.

При этом в таких системах присутствуют люди, обладающие свободой выбора действий в процессе функционирования.

Данные свойства присущи непрерывному производству, в том числе стекольным предприятиям, производящим листовое стекло.

Качество производимого на непрерывном производстве продукта, т.е. совокупность его свойств, закладывается при проектировании и обеспечивается в процессе производства [3]. Между показателями качества продукции и параметрами технологических процессов существует определенная взаимосвязь, отражающая производственный процесс. Возможность прогнозирования качества продукции и своевременной корректировки технологического процесса обеспечивается путем построения модели, реализующей данную взаимосвязь. Использование данной модели в составе системы управления позволит повысить эффективность производства за счет возможности разработки предупреждающих действий на объект управления. Таким образом, можно будет сократить количество продукции несоответствующего уровня качества и получить экономический эффект при минимальных инвестициях. Однако построение моделей, основанных на формальных связях, зачастую затруднено из-за сложности природы процессов.

Один из возможных подходов к решению этой проблемы связан с внедрением современных методов моделирования технологического процесса, одним из которых является ситуационное управление и модель гибридной сети. Ситуационное управление обладает механизмом описания объекта и процессов функционирования на естественном языке. Модель искусственных нейронных сетей интересует нас своим простым, но достаточно эффективным механизмом обучения и модификации.

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 122030400209-9 Разработка интеллектуальных моделей и методов управления сложными человеко-машинными системами в условиях критических ситуаций).

1. Описание производства флоат-стекла

Опишем процесса формирования листового стекла. В стекловаренной печи из шихты и стеклобоя под воздействием высоких температур формируется жидкая стекломасса, которая через специальный канал стекает в ванну расплава. В ванне расплава находится расплав металла или сплава различных металлов, на который и растекается стекломасса, образуя ленту стекла с ровной поверхностью.

Гладкость стекла достигается за счет сил поверхностного натяжения (сверху) и контакта с гладкой поверхностью жидкого сплава металлов (снизу). В этом и состоит суть флоат-процесса.

В ванне расплава выделим следующие элементы, влияющие на протекание процесса и свойства стекла, необходимые для учета в разрабатываемой модели управления. Во-первых, слой металла, на котором формируется лента стекла, он должен обладать определенными свойствами. Во-вторых, защитная атмосфера, предохраняющая металл от окисления и коррозии. В-третьих, технологические средства управления скоростью стекания жидкой стекломассы, средства формирования ленты стекла и управления ее толщиной, средства вывода ленты стекла в печь отжига. Также необходимо упомянуть средства управления температурой внутри ванны расплава – это охлаждающие и нагревающие элементы (рисунок 1).

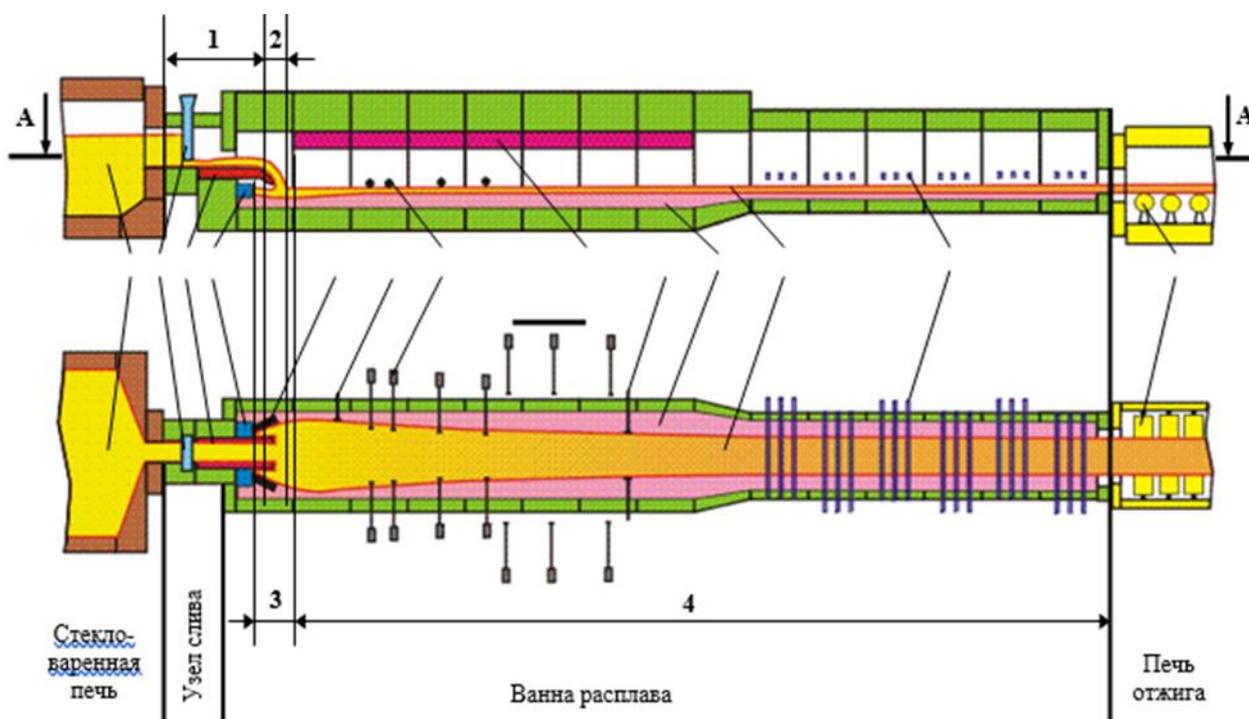


Рис. 1. Флоат-процесс

Таким образом, весь процесс можем разделить на несколько этапов. Каждый этап осуществляется на своем участке ванны расплава. В самом начале ванны происходит вытекание жидкой массы стекла с определенной скоростью, которая важна для формирования ровной поверхности стекла. Далее идет участок, на котором стекломасса растекается и образует ровную лужу, которая далее под воздействием растягивающих устройств и нагревателей становится лентой стекла заданной толщины. В конце ванны расплава стекло охлаждают и с помощью растягивающих устройств продвигают далее в печь отжига, после которой готовое стекло обрезается и передается на контроль.

Для характеристики данного технологического процесса как объекта управления необходимо выделить входные, выходные координаты и возмущения.

Входные параметры:

- скорость ленты стекла;
- скорости растягивающих устройств;
- температура металла;
- степень стабильности положения ленты стекла;
- объем расходуемой электроэнергии;
- объем природного газа;
- давление защитной атмосферы;

- расход металла.
Выходные параметры:
- показатели качества листового стекла: коэффициент дисперсии; оптическая однородность; коэффициент пропускания; двулучепреломление; бессвильность; пузырность;
- количество отбракованного стекла.
Возмущения:
- отключение подачи электроэнергии;
- отключение подачи газа;
- прекращение подачи защитной атмосферы или ее составляющих;
- параметры внешней среды (температура, давление, влажность воздуха);
- состояние оборудования, его возможный износ и вероятность отказа.

В качестве целевой функции используем себестоимость продукции, при этом будем учитывать что себестоимость при непрерывном производстве зависит от стабильности процесса и отсутствия остановок промышленной линии.

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

Пусть $S = \{s_1(t), s_2(t), \dots, s_n(t)\}$ – множество ситуаций, характеризуемых набором признаков $P = (p_1, p_2, \dots, p_m)$, значения которых выбираются из множества значений признаков $A = \{a_1, a_2, \dots, a_k\}$. Каждая ситуация $s_i(t)$ представляется как набор признаков (p_j) , принимающих значение из множества A . Такое описание ситуаций называется признаковым. Каждой ситуации $s_i(t)$ соответствует ситуация $s_k(t)$, в которую объект перейдет через некоторое, заранее неопределенное время, если не будет выбрано ни одно управляющее воздействие. Каждой ситуации соответствует набор управляющих воздействий $U = (u_1, u_2, \dots, u_l)$ из множества управляющих воздействий $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_w\}$, которые необходимо применить для компенсации режима варки-выработки.

Выделим признаки, описывающие функционирование ванны расплава и состояние ленты стекла, необходимые для оценки протекающего процесса: это скорость продвижения ленты стекла, скорости растягивающих устройств, выбранная толщина стекла, температура в ванне расплава, давление защитной атмосферы.

В качестве управляющих воздействий используются действия оператора по управлению флот-ванной.

Все множество ситуаций необходимо разделить на классы аварийных, предаварийных и штатных ситуаций. Штатные ситуации соответствуют штатным режимам функционирования технологического оборудования, выбранным технологом для текущего режима выпуска. Таким образом, для каждого из возможных технологических режимов будет своя классификация пространства ситуаций.

Предаварийные ситуации характеризуются тем, что соответствующая текущей предаварийной ситуации $s_i(t)$ конечная ситуация $s_k(t)$ является аварийной, то есть недопустимой в данном режиме, приводящей к остановке производства или выпуску брака.

Необходимо создать модель ситуации, позволяющую быстро идентифицировать ситуации, возникающие в процессе производства, определять, насколько близка текущая ситуация к аварийной и выбирать оптимальное управляющее воздействие, приводящее процесс в штатный режим.

Сформулируем задачу управления на основе полученного описания процесса формования стекла.

Необходимо определить и сформулировать в аналитическом виде зависимость качества стекла от параметров процесса формования, на основе построенной модели разработать алгоритмы и методы управления, которые на заданном интервале времени $[t_n, t_k]$ на основе полученного с объекта описания текущей ситуации в виде упорядоченного набора признаков (p_j) определить, может ли текущая ситуация $s_i(t)$ привести к остановке процесса, ухудшить качество производимого стекла, после чего предпринять необходимые действия по коррекции процесса производства листового стекла, переведя объект управления из состояния $s_0(t) \in S$ в состояние $s_k(t) \in S$, обеспечивающее минимум функции потерь при поддержании стабильности производства

$$\int_{t_n}^{t_k} D(s(t), u(t)) dt \rightarrow \min \quad (1)$$

с учетом ограничений продолжительности работ по ее ликвидации $t_k - t_n \leq \varepsilon$, и с ограничением величины максимума потерь:

$$\int_{t_n}^{t_k} D(s(t), u(t)) dt \leq D_{max}, \quad (2)$$

а также с учетом других ограничений, накладываемые особенностями функционирования и структурой объекта:

$$M_i(s(t), u(t)) \geq 0, i = \overline{1, n_1}; \quad (3)$$

$$M_i(s(t), u(t)) \leq 0, i = \overline{n_1 + 1, n_2}; \quad (4)$$

при граничных условиях:

$$\begin{aligned} F_L^{(t_h)}(s(t), u(t)) &= 0; L = \overline{n_2 + 1, n_3}; \\ F_L^{(t_k)}(s(t), u(t)) &= 0; L = \overline{n_3 + 1, n_4}; \end{aligned} \quad (5)$$

(t_h и t_k – начало и конец рассматриваемой ситуации, соответственно; D_{max} – максимально разрешенное значение потерь; $\varepsilon, n_i, i = \overline{1, 4}$ – заранее заданные постоянные).

После предпринятых действий необходимо проанализировать полученную ситуацию на объекте и при необходимости внести изменения в алгоритм действий для ситуаций данного класса.

Необходимо отметить, что главной проблемой в данном случае представляет собой большая инерционность процесса, а также запоздалый контроль показателей качества стекла.

Таким образом, возникает необходимость построить модель флоат-процесса, позволяющую предугадывать свойства стекла, а также модель, показывающую влияние управляющих воздействий на параметры технологического процесса в реальном времени.

3. Пример решения задачи

Одним из перспективных способов решения задач управления с широким использованием средств естественного языка для описания ситуаций и моделирования процессов производства в настоящее время является направление ситуационного управления.

В основе ситуационного управления лежит использование специализированного языка для описания ситуаций на объекте управления. Для создания этого языка на основе экспертного описания объекта, его структуры, процессов функционирования на естественном языке выделяют структурные элементы, основные понятия и термины, а также действия по переводу ситуаций из одного класса в другой (управления). Затем создаются и наполняются соответствующие словари.

Как основные части будущего языка управления определим понятия, имена, отношения и действия [5]. Затем наполним соответствующие словари содержимым, необходимым для описания флоат-процесса.

Для удобства формирования языка ситуационного управления словарь понятий разделим на подмножества понятий, описывающих различные части объекта управления: обслуживающий персонал; системы обеспечения; состояние ванны расплава; качественные характеристики производимого стекла.

При этом словарь отношений универсален. Он включает стандартный набор правил: и, или, или-не и так далее.

Действий по переводу одной ситуации в другую не так много, поэтому разбиение словаря действий не требуется.

Подготовительный этап состоит в переводе экспертного описания ситуаций на язык разрабатываемой системы ситуационного управления. После чего необходимо классифицировать имеющиеся описания ситуаций по степени близости к аварийным, то есть выделить какие ситуации требуют незамедлительного принятия решений, а какие, наоборот, являются целевыми для сохранения стабильности процесса. Таким образом к одному классу будут отнесены ситуации, которые требуют одинакового набора управляющих воздействий.

При дальнейшем функционировании системы управления необходимо будет определять класс каждой возникающей на объекте ситуации, для этого необходимо определить метрику выявляющую близость ситуации к тому или иному классу. При этом классы ситуаций будем представлять в виде некоего нечеткого множества, а метрика будет аналогичная функции принадлежности в нечеткой логике.

Подаваемые на вход системы управления данные с объекта будут переводиться в соответствующие описания на языке ситуационного управления. По этому описанию с помощью метрики близости выявляются ближайшие к текущей ситуации классы и определяются соответствующие наборы управляющих воздействий. На основе предложенных вариантов инженером-технологом выбирается

необходимый алгоритм действий, результаты которого в дальнейшем анализируются. По итогам анализа вносятся изменения в метрику и описание классов. Результатом воздействия должна стать ситуация, которая будет наиболее близка к штатной [5].

Для естественного языка характерна нечеткость описания ситуации. Для учета этой особенности добавим словарь модификаторов, который будет включать в себя такие объекты как “очень”, “близко”, “почти”, “чуть-чуть” и т.п.

Одной из возможных реализаций будет являться создание гибридной нейронной сети, включающей как нечеткую логику, так и искусственные нейронные сети.

По сути, модель гибридной сети, которая сочетает модели нечеткой логики и алгоритмы обучения искусственных нейронных сетей может рассматриваться в качестве современной модели ситуационного управления, основанной на современной концепции искусственного интеллекта.

Во входном слое сети будет происходить трансформация полученных с датчиков параметров производства в виде числовых значений в различные лингвистические переменные. Для удобства выберем трапециевидные формы функций принадлежности нечетких переменных (рис. 2).

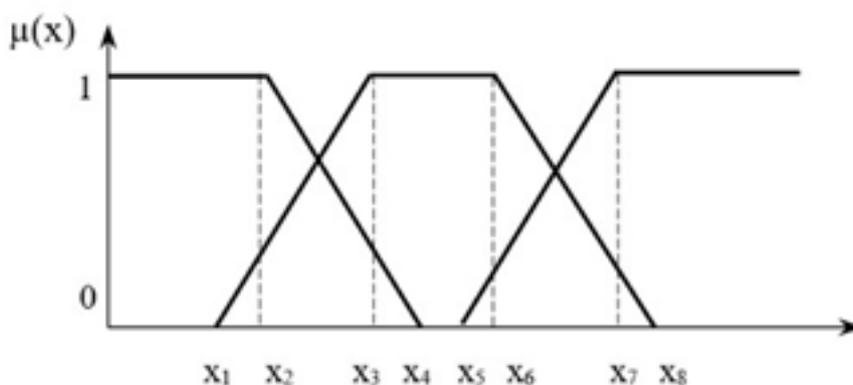


Рис. 2. Вид функций принадлежности входных лингвистических переменных

Далее во втором, скрытом слое, на основе полученных лингвистических переменных, описывающих текущую ситуацию, определяем наличие определенного набора признаков ситуации. Для некоторых признаков могут понадобиться ретроспективные данные. Степень истинности определенных признаков вычисляем с использованием функций нечеткой логики (нечеткое и, нечеткое или) на основе значений функций принадлежности описаний ситуации.

В третьем слое на основе вычисленных степеней истинности признаков определим значение истинности принадлежности текущей ситуации к тому или иному классу по следующей формуле

$$y_i(x) = \frac{\sum_{j=1}^J w_j z_j}{\sum_{j=1}^J w_j}, \quad (6)$$

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

В итоге работы искусственной нейронной сети мы определим степень принадлежности (меру близости) ситуации к тому или иному классу. Вектор управляющих воздействий является единым для всех ситуаций выбранного класса. Если однозначно определить класс ситуации затруднительно, то решение по тому, какое управляющее воздействие выбрать, принимает оператор. В дальнейшем, по итогам принятого решения делается вывод о точности определения класса и вносятся корректировки в веса значимости. Таким образом обучение сети продолжается на всем времени ее функционирования.

Создание и обучение нейронной сети при этом происходит одновременно. Добавляем первую ситуацию, формируя для нее входной, скрытый и выходной слои. Далее добавляем следующую ситуацию, добавляя нейронные к уже имеющимся. После чего снова прогоняем через нейронную сеть набор входных переменных первой ситуации и корректируем веса значимости признаков.

4. Заключение

Выполнен анализ объекта управления – непрерывного производства. В качестве примера выбран технологический процесс производства листового стекла. Выделены основные этапы формования ленты стекла, определены входные и выходные параметры разрабатываемой системы управления.

Поставлены задачи, решение которых позволит снизить себестоимость продукции за счет обеспечения стабильности функционирования объекта управления.

Проведенные исследования в части разработки системы ситуационного управления при производстве листового стекла показывают целесообразность ее использования на данных производствах. В настоящее время осуществляется апробация данного метода на реально действующих предприятиях стекольной промышленности 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)*, vol. 13. No. 6. 2022. 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. *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. Pp. 1-4.
5. *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. Pp. 1-4.
6. *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.