

# СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ИХ АВТОМАТИЗАЦИИ

---

*rubanov@intbel.ru*

**Рубанов В.Г.**, д-р техн. наук, проф.,  
**Кижук А.С.**, канд. техн. наук, проф.,  
**Гольцов Ю.А.**, магистрант,  
**Кариков Е.Б.**, инженер

*Белгородский государственный технологический  
университет им. В. Г. Шухова*

**Аннотация.** В статье описан процесс моделирования сложных объектов управления. Проведен анализ существующих подходов к моделированию на основе рекуррентных нейронных сетей. Предложена система автоматического управления тепловым режимом технологического процесса выращивания кристалла сапфира.

**Ключевые слова:** дробная динамика, идентификация объекта, нейронные сети, выращивание сапфира, система управления.

Автоматическое управление любым объектом или процессом является наиболее эффективным в случае, когда при проектировании системы автоматизации разработчик располагает адекватной математической моделью объекта, что в условиях сложных процессов теплообмена и аэродинамики, описываемых дифференциальными уравнениями в частных производных, оказывается проблематичным. В силу этого приходится использовать достаточно приближенные модели, пригодные для решения задач проектирования систем автоматизации, а это в свою очередь приводит к снижению эффективности управления. Наиболее высокий уровень адекватности для дифференциальных уравнений в частных производных имеют модели дробного порядка дифференциальных уравнений в области действительного переменного, или передаточных функций дробного порядка в области комплексного переменного [1,2,3].

Таким образом, возникает задача разработки метода построения модели теплотехнологического процесса, не позволяющего использовать классические подходы экспериментирования с типовыми воздействиями или с применением естественных сигналов и последующей статистической обработкой с целью решения уравнения

Винера-Хопфа. Такой подход был разработан авторами и обоснован математически. Он основан на применении нейронных сетей как промежуточного этапа идентификации, позволяющего в дальнейшем использовать нейросеть в форме «черного ящика» для проведения классического эксперимента с типовыми сигналами. Результаты этой разработки проиллюстрированы на холодильнике «Волга-75»,

Особенностью такого подхода является использование на промежуточном этапе идентификации нейронной сети, представляющей собой авторегрессионную сеть с экзогенными входами или же нейронную сеть структуры Элмана. При использовании объектов, описываемых дифференциальными уравнениями в частных производных, например, теплотехнологических объектов, связанных с процессами охлаждения или процессами как принудительного нагревания, так и нагревания, сопутствующего самому течению технологического процесса как это имеет место при механической обработке на станках, где нагрев детали можно представить в виде модели, описываемой уравнениями математической физики (задача нагревания стержня), производится замена в структуре нейронной сети элемента дискретного запаздывания элементом дробного запаздывания. В этом случае полученная сеть вместо операции конечной разности целого порядка производит аналогичное вычисление конечной разности дробного порядка, что позволяет в последующем описать объект уравнения (процесс резания с точки зрения влияния теплового поля) в форме передаточной функции дробного порядка вида:

$$W(s) = K \frac{b_m s^{m/q} + b_{m-1} s^{(m-1)/q} + \dots + b_1 s^{1/q} + 1}{a_n s^{n/q} + a_{n-1} s^{(n-1)/q} + \dots + a_1 s^{1/q} + 1},$$

где  $K; a_1, \dots, a_n; b_1, \dots, b_m$  – постоянные коэффициенты,  $q \in \mathbb{N}$  – общий порядок дробных операций,  $m, n \in \mathbb{Z}$ ,  $n \geq m \geq 0$ .

Наиболее существенным недостатком метода аппроксимации динамических объектов с помощью нейронных сетей является «непрозрачность» нейронной сети для исследователя. В результате данной аппроксимации, мы получаем «черный ящик», внутренние процессы в котором так же неочевидны для исследователя, как и в оригинале (объект). Такая ситуация осложняется еще и тем, что в качестве объекта аппроксимации выступает объект, в котором присутствуют нелинейности. Для синтеза закона управления все же необходимо располагать линеаризованной моделью работы объекта

управления, поскольку получение такой модели осуществляется классическим путем с использованием типовых воздействий и последующей аппроксимации отклика с помощью метода Симою (в случае идентификации объекта целого порядка) или модифицированного метода Симою (для объекта дробного порядка) [3,4,5].

Выполнение идентификации позволяет получить модель исследуемого объекта, как в форме нейронных сетей, так и в форме передаточных функций дробного порядка, позволяющий выполнить расчет регулирующего устройства дробного порядка. Системы управления дробного порядка имеют ряд существенных отличий по сравнению системами управления целого порядка:

- увеличение количества степеней свободы за счет возможности варьирования порядка интегро-дифференциальных преобразований регулятора,

- система дробного порядка обладает свойством неограниченной памяти объекта, что необходимо учитывать при синтезе управляющего устройства.

Следует отметить, что получение модели в форме нейронной сети позволяет осуществлять анализ и синтез системы управления с применением нечетких и нейро-нечетких методов теории автоматического управления, что также расширяет границы применимости предложенного метода идентификации [6].

Данный метод идентификации применим как для теплотехнологических объектов в машиностроении, так и для объектов, используемых при производстве искусственных кристаллов, где проводятся поисковые исследования по отысканию наиболее эффективного способа получения тепловой энергии.

В настоящее время разработана микропроцессорная система автоматического управления тепловым режимом технологического процесса выращивания кристалла сапфира (рис. 1). В системе используется понижающий трансформатор мощностью 50-60 кВт для питания нагревательного элемента. Тиристорный регулятор ТУА110 (ТР) управляет парой тиристоров в цепи первичной обмотки силового трансформатора (Т1). Принцип работы такого регулятора основан на преобразовании постоянного напряжения на входе в последовательность фазных импульсов, управляющих тиристорами. В системе помимо ТР используется система промышленных контроллеров, с помощью которых программным образом изменяется входное напряжения на регуляторе в зависимости от задаваемой

программной кривой температуры в тигле [7]. Промышленный контроллер I7188 с мезонинной платой (X310) принимает данные с модуля аналогового ввода I7017 по интерфейсу RS485 и на их основе, согласно заданной в нём программе (реализующей закон управления), формирует управляющий сигнал на ТР, подключенный к первичной обмотке Т1, чем осуществляет регулирование мощности на нагревателе. Понижающий трансформатор Т1 преобразует напряжение сети 0...380 В (~) в 0...20 В (~), к которому подключён нагреватель (ТЭН), выделяющий тепловую энергию для нагрева шихты внутри тигля до 2050 градусов Цельсия. Сопrotивление ТЭН равно 0.008 Ом. Преобразователь напряжения (ПН) преобразует напряжения с трансформатора (Т1) 0...20 В (~) в унифицированный сигнал 0...10 В (=). Восьмиканальный модуль аналогового ввода I7017 с диапазонами настройки каналов  $\pm 150$  мВ,  $\pm 500$  мВ,  $\pm 1$  В,  $\pm 5$  В,  $\pm 10$  В,  $\pm 20$  мА; с 16-ти разрядным АЦП; частотой преобразования сигнала 16 Гц (0.06 с) передаёт усиленный и скомпенсированный сигнал с термопары (ТЗ) через усилитель сигнала термопары (УСТ) и схему компенсации температуры холодного спая (СК) величиной 0...10 В (=), а также преобразованный сигнал вторичной обмотки Т1 0..10 В (=) промышленному контроллеру I7188[8].

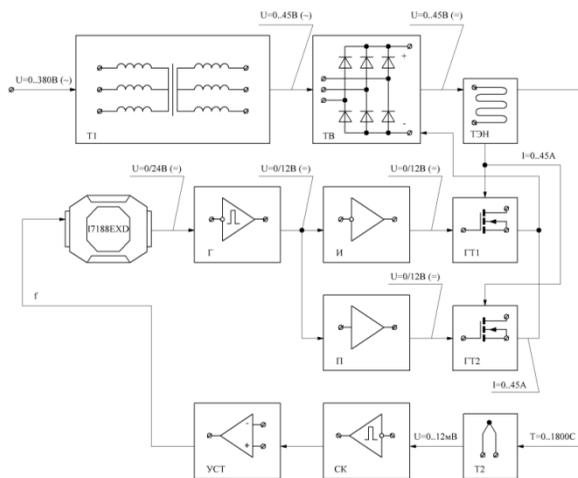


Рисунок 1 – Блок-схема микропроцессорной системы управления температурным режимом

Разработанная микропроцессорная система управления температурным режимом нагревательной установки, реализующей технологический процесс выращивания кристалла сапфира, имеет существенное преимущество по сравнению с существующей системой, так как позволяет устранить перекося фаз из-за неравномерности нагрузки вследствие включения нескольких установок одновременно, что стало возможным благодаря применению трехфазного трансформатора с управлением по вторичной обмотке; избежать появления высших гармоник, порождающих помехи в промышленной сети питания при реализации режимов «плавного запуска».

*Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-41-08009 «р\_офи\_м».*

#### **Список литературы:**

1. Интеллектуальные подходы к созданию советующей системы управления вращающейся цементной печью обжига клинкера / А. Г. Бажанов, А.С. Копылов, В.А. Порхало, Д.А. Юдин, Е.Б. Кариков, В.Г. Рубанов, В.З. Магергут // Цемент и его применение. 2013. № 3. С. 77-82.
2. Величко Д. В., Магергут В.З. Построение детерминированной и стохастической динамических моделей процесса нагрева пеностекольной шихты // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2015. № 2. С. 90-94.
3. Мишунин В.В., Рубанов В.Г. Системы автоматического управления и контроля с дробно-иррациональными передаточными функциями: монография. Белгород: Изд-во БГТУ. 2004. 253 с.
4. Podlubny I. Fractional Differential Equations. An Introduction to Fractional Derivatives, Fractional Differential Equations, Some Methods of Their Solution and Some of Their Applications. // Academic Press, San Diego - New York - London, 1999.
5. Karikov E. B., Rubanov E.B., Klassen V.K. Construction of a Dynamic Neural Network Model as a Stage of Grate Cooler Automation. // World Applied Sciences Journal. 2013. T.25 № 2. P. 227-232.
6. Khaykin S. Neyronnye seti. Polnyy kurs 2-e izd., [Neural Networks. Full Course 2nd ed.] ispr.: Per. s angl. M.: Izd. OOO «I. D. Vilyams» [Moscow: Publishing house «I. D. Vilyams»], 2006. 1104 P. 3.
7. Багдасаров Х.С., Горяинов Л.А. Тепло - и массоперенос при выращивании монокристаллов направленной кристаллизацией. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 224 с.

8. Пат. РФ 2515129, МПК G05D 23/00. Система регулирования температуры электронагрева [Реферат] / Кижук А.С., Рубанов В.Г., Чуев А.В.; патентообладатель Белгород БГТУ им.В.Г.Шухова. № 2013101096/09; заявл. 09.01.13; опубл. 27.04.14, Бюл. № 12. 5с.