

Введем понятие облака коэффициентов. Облаком коэффициентов будем называть представление значений весовых коэффициентов в виде изображения (Рисунок). Для построения облака коэффициентов все значения нормируются сначала линейно относительно интервала [0;255], причём пиксель цвета 0x7F7F7F согласно нотации RGB соответствует коэффициенту со значением, близким или равным 0.

Намного лучшие результаты при распознавании показывает метод обучения и распознавания «свой–чужой». Суть его состоит в формировании нескольких матриц весовых коэффициентов. Каждая матрица весовых коэффициентов настроена на распознавание объектов одной категории. Поступающие на вход изображения могут иметь лишь 2 различных значения кода: изображения, принадлежащие распознаваемому классу, характеризует одно значение, а не принадлежащие ему – другое.

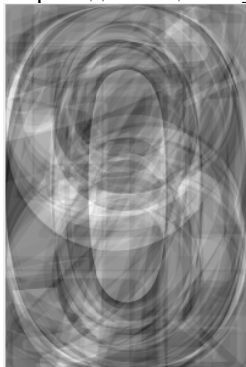


Рисунок. Весовые коэффициенты обученной навыковой системы технического зрения

Естественно, для распознавания 10 различных цифр требуется обучить систему 10 раз и хранить 10 матриц коэффициентов, однако данный подход является гораздо более эффективным, чем предыдущий и поэтому оправдывает накладные расходы в виде памяти, которые не являются в действительности столь критичными.

При обучении системы 90 изображениями с кодами -1 и 1 и последующем распознавании 10 неиспользованных изображений (один шрифт, которому систему не обучали) все 10 обученных систем (для цифр от 0 до 9) давали верный результат, возвращая для «своего» изображения положительный, а для «чужого» - отрицательный код, отклоняясь в худшем случае на 0.5 при допустимом отклонении 1.0. Больше того, если возникает спорная ситуация и две нейросети при подаче на вход изображения возвращают положительный код, можно принять решение в пользу той из них, которая вернула больший код либо код, менее отстоящий от 1. Такие ситуации, естественно, необходимо фиксировать и переобучать системы с учётом данных «спорных» изображений.

Таким образом, навыковая система технического зрения способна обучаться безошибочному распознаванию изображений из обучающей выборки и частичному распознаванию изображений из тестирующей выборки. В целом достоверность распознавания изображений цифр составила 92% при общей матрице весовых коэффициентов. Для повышения достоверности навыковой системы целесообразно увеличить количество матриц весовых коэффициентов, а также включать в обучающую выборку негативные - «чужие» примеры.

МОДИФИЦИРОВАННАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ И СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ SIEMENS-РЕАКТОРОМ

Сачков С.А., Козин К.А., Горюнов А.Г.

Научный руководитель: Козин К.А., ассистент кафедры ЭАФУ

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: perfer@sibmail.com

Развитие в России высокотехнологичной индустрии микроэлектроники, силовой электроники и солнечной энергетики во многом зависит от собственной базы полупроводниковых материалов и, в первую очередь – кремния. В основе производств базового материала (поликристаллического кремния (ПКК) высокой

чистоты) лежит Siemens-технология, реализующая метод парофазного химического осаждения – “Chemical vapore deposition”(CVD) кремния в процессе водородного восстановления трихлорсилана (ТХС). Процесс проводят в реакторах проточного типа (Siemens-реакторах), в котором образующийся кремний осаждается на

разогреваемых электрическим током кремниевых стержнях-основах. Восстановление хлорсиланов ведут при постоянной температуре поверхности стержней-подложек в интервале 1000–1200°C [1].

Эффективность Siemens-технологии в частности ограничивается необходимостью нахождения компромисса между скоростью осаждения и качеством получаемого ПКК, путем обеспечения оптимальных значений мольного отношения $H_2/SiHCl_3$ (трихлорсилан, ТХС), плотности подачи $SiHCl_3$ ($kg/m^2 \cdot c$) и температурой поверхности стержней в течение длительного времени (до 200 ч), что требует использование систем автоматического управления. При этом процесс осаждения кремния обладает рядом особенностей [2] которые затрудняют ручную стабилизацию температуры стержней.

Отсутствие информации о зарубежном опыте автоматизации подобных производств, а также отсутствие в России опыта эффективного и надежного управления Siemens-реактором является серьезной проблемой в задаче снижения себестоимости продукции для повышения конкурентоспособности и инвестиционной привлекательности этих производств РФ на международном рынке.

На кафедре ЭАФУ ТПУ были ранее разработаны математическая модель Siemens-реактора как объекта управления [3] и адаптивная двухконтурная САУ [2]. Используемый в модели «зонный» подход расчета температурного профиля кремниевых стержней в аппарате не позволяет качественного проведения синтеза САУ из-за пилообразного изменения основных выходных технологических переменных. Используемая в алгоритме управления процедура коррекции скорости осаждения кремния сильно зависит от химического состава парогазовой смеси (ПГС) в реакторе, что снижает универсальность предложенного алгоритма управления.

В данной работе предлагается модифицировать представленную модель путем определение температуры поверхности кремниевго стержня по результатам решения нестационарного уравнения теплопроводности в цилиндрической системе координат:

$$\rho c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{J^2}{\sigma(T,r)}, \quad (1)$$

где r – радиальная координата, м; ρ – плотность кремния, kg/m^3 ; c , λ и σ – удельная теплоемкость, Дж/кг·К, теплопроводность, Вт/м·К и электропроводность, 1/Ом·м кремния соответственно, J – плотность тока, A/m^2 , определяемая величиной силы электрического тока резистивного нагрева стержня – I , А.

Для уравнения (1) начальное условие: $T(t_i, r(t_i)) = T(t_{i-1}, r(t_{i-1}))$, граничные условия следующие:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0;$$

$$\left. \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_s} = h(T - T_{TTC}) + \varepsilon \sigma_B (T^4 - T_{TTC}^4) \Big|_{r=r_s};$$

где h – коэффициент конвекции и теплопередачи, Вт/м²·К; ε – степень черноты кремния; σ_B – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/м²·К⁴.

Разработанная математическая модель была реализована в виде компьютерной модели в пакете Matlab/Simulink. Решение дифференциальных уравнений теплового баланса осуществлялось с использованием встроенного решателя «рдер»

Для повышения гибкости и универсальности алгоритма управления, ранее предложенной САУ, предлагается использование экстраполятора 1-ого порядка при расчете текущего значения D_{prog} , что позволит адаптировать расчет R_{prog} к реальным условиям изменения диаметра стержней. Принцип работы экстраполятора представлен на рисунке 1.

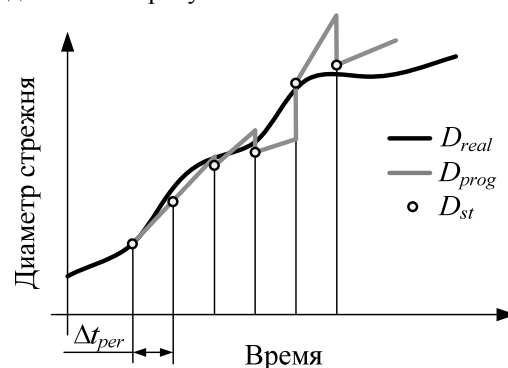


Рис.1. Принцип работы экстраполятора 1-ого порядка по диаметру

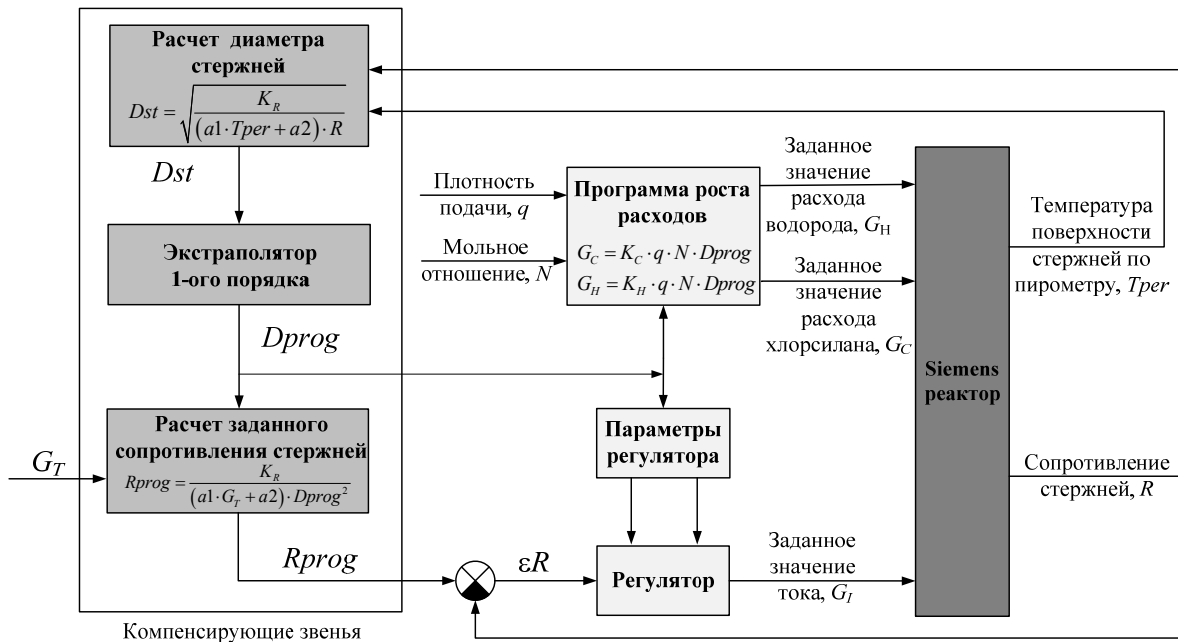


Рис.2. Структурная схема САУ температурой стержней Siemens-реактора

Структурная схема САУ температурой стержней Siemens-реактора представлена на рисунке 2.

Модификация модели Siemens-реактор потребовала пересчета параметров настройки регулятора. Для ПИ-закона регулирования методом оптимального модуля [4] были определены зависимости параметров настройки от диаметра.

Результаты ведения технологического процесса производства поликристаллического кремния на промышленной установке с применением различных алгоритмов управления представлены на рисунке 3.

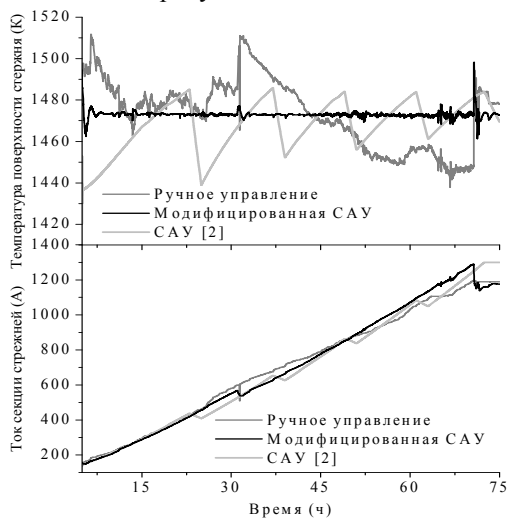


Рис.3. Временные диаграммы основных переменных при сравнении ведения процесса с применением различных алгоритмов управления.

Сравнительный анализ временных диаграмм показывает, что использование модифицированной САУ позволяет снизить на порядок среднеквадратичное отклонение температуры стержней от заданного значения по сравнению иными алгоритмами управления.

Список литературы

1. Фалькевич Э.С, Пульнер Э.О., Червоный И.Ф. и др. Технология полупроводникового кремния – М.: Металлургия, 1992. – 408 с
2. Козин К.А., Горюнов А.Г., Ливенцов С.Н., Гаврилов П.М., Ревенко Ю.А. Алгоритм управления Siemens-реактором производства поликристаллического кремния // Известия Томского политехнического университета. Т. 315, № 5. – Томск: ТПУ, 2009 – С. 70-74.
3. Горюнов А.Г., Козин К.А., Ливенцов С.Н. и др. Математическая модель Siemens-реактора как объекта управления // Цветные металлы. – 2009. – № 7. – С. 69–77.
4. Гурецкий Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием. – М.: Машиностроение, 1974. – 327с.