

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Погребной А.В. Математические и программные средства построения архитектуры и топологии сети вычислительной системы для управления территориально распределенными объектами: автореф. дис.... канд. техн. наук: 05.13.11. – М., 2008. – 197 с.
2. Погребной Ал.В., Погребной Ан.В. Алгоритм решения задачи компактного разбиения множества объектов территориально

- распределенной системы // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 5. – С. 22–28.
3. Пантелеев А.В., Летова Т.А. Методы оптимизации в примерах и задачах. – М.: Высшая школа, 2002. – 544 с.
4. Галкина В.Н. Дискретная математика: комбинаторная оптимизация на графах. – М.: Гелиос АРВ, 2003. – 232 с.

Поступила 17.10.2011 г.

УДК 66.012–52

СИНТЕЗ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫМ ОБЪЕКТОМ – SIEMENS-РЕАКТОРОМ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

К.А. Козин^{1,2}, А.Г. Горюнов^{1,2}, С.А. Сачков¹

¹Томский политехнический университет
²ООО «ОСТом», г. Томск
E-mail: kozin@tpu.ru

Рассматривается проблема автоматического управления сложными объектами химического производства на примере Siemens-реактора получения поликристаллического кремния. Показаны этапы синтеза системы управления, использующей адаптивный принцип с идентификационным методом настройки параметров регулятора. Методом математического моделирования доказывается существенное снижение влияния «человеческого фактора» и повышение качества управления технологическим процессом при использовании разработанной системы управления.

Ключевые слова:

Siemens-реактор, поликристаллический кремний, система автоматического управления, математическое моделирование.

Key words:

Siemens-reactor, polycrystalline silicon, control system, computer modeling.

Введение

В практических задачах автоматического управления особое место занимает проблема управления сложными объектами. Как правило, это многомерные объекты, которые характеризуются многозначностью переменных, значительной нелинейностью и нестационарностью, что в условиях недостатка информации о возмущающих воздействиях и контроля основных переменных значительно затрудняет использование подходов классической теории автоматического управления. Широкие возможности в этой области представляют методы современной теории автоматического управления [1]: адаптивные, с прогнозирующими моделями (MPC – *Model predictive control*), а также интеллектуальные.

Трудность реализации этих методов и соответственно слабая степень их практического распространения была снята только с развитием и повсеместном внедрении промышленных микропроцессорных контроллеров. Следует подчеркнуть, что, ни один из методов не является универсальным. «Каждый из методов имеет свои преимущества и недостатки, которые проявляются в приложениях. На практике должен быть достигнут компромисс между сложностью, реализуемостью и надежностью» [2]. А отсутствие единого подхода синтеза

систем автоматического управления (САУ) сложными объектами требует детального анализа особенностей функционирования конкретного исследуемого объекта управления (ОУ).

Данная работа посвящена синтезу адаптивной САУ Siemens-реактором [3] получения поликристаллического кремния. На сегодняшний день Siemens-процесс остается преобладающей технологией получения высокочистого поликристаллического кремния – материала микроэлектроники и фотовольтаики. Но, несмотря на более чем полувековую историю и широкую известность этой технологии, встречается мало работ, посвященных задаче автоматического управления центральным аппаратом – Siemens-реактором [4, 5]. Это объясняется узкой специализацией вопроса, сложностью ОУ и отсутствием длительного времени средств автоматизации, позволяющих реализовывать современные методы автоматического управления.

Анализ функционирования Siemens-реактора

Siemens-реактор представляет собой химический реактор полунепрерывного действия проточного типа с водоохлаждаемой рубашкой. Процесс получения кремния основан на его осаждении из парогазовой смеси (*chemical vapour deposition*, CVD), как правило, водорода и трихлорсилана (ТХС) – SiHCl_3 . Водородное восстановление хлор-

силанов протекает на поверхности установленных в реакторе кремниевых U-образных стержнях-основах. Высота и диаметр последних может достигать 2 м и 10...12 мм соответственно, а их количество в реакторе до 36 ед. Термодинамика и кинетика процесса требуют высокой температуры (1000...1200 °С), которая обеспечивается резистивным нагревом стержней и управляется величиной электрического тока, протекающего через них. При достижении диаметра стержней критических значений (140...190 мм) процесс прекращают. Рост диаметра стержней ведет к повышению скорости осаждения кремния, а также тепловых потерь. Поддержание неизменной температуры поверхности стержней требует увеличения силы тока, которое ограничено процессом локального плавления центральной части кремниевого стержня. Учет этого процесса осложнен неконтролируемым ростом радиального градиента температуры внутри стержней и приводит к намеренному снижению оператором температуры поверхности стержней по ходу процесса.

Рассматриваемая технология характеризуется высокими энергетическими затратами (90...270 кВт·ч/кг [3, 6]) и необходимостью нахождения компромисса между скоростью осаждения и качеством (чистотой и плотностью) получаемого поликристаллического кремния. Это достигается управлением температурой стержней и расходами исходных реагентов (H_2 и $SiHCl_3$) для обеспечения оптимальных значений мольного отношения $H_2/SiHCl_3$ и плотности подачи $SiHCl_3$, кг/(м²·с) [3, 7].

При ручном управлении один из главных источников отклонений технологического процесса от оптимального режима – ошибки в действиях оператора. Поэтому при длительности процесса до 200 ч даже малые ошибки в его управлении носят кумулятивный характер, что существенно сказывается на качестве и количестве целевого продукта, технологических затратах и делает «человеческий фактор» определяющим.

Разработка САУ температурой стержней и расходами исходных реагентов с использованием классических методов существенно затруднена сложным характером Siemens-реактора как ОУ, а именно:

- многомерностью объекта и многосвязностью основных его переменных, что наглядно представлено на структурной схеме в работе [4];
- существенной нестационарностью вследствие роста диаметра стержней в процессе осаждения кремния и отсутствием возможности его контроля;
- нелинейностью, определяемой обратной зависимостью электрического сопротивления кремния от температуры и нелинейным характером тепловых потерь стержней вследствие теплообмена излучением;
- возможностью контроля температуры лишь посредством точечного измерения пирометром ИК-излучения;

- отсутствием однозначной взаимосвязи между диаметром, электрическим сопротивлением и температурой стержней.

Учитывая, что проведение производственных экспериментов, необходимых для синтеза системы управления затруднено ввиду недопустимости вмешательства в технологический процесс, а также невозможности измерения всех требуемых переменных, математическое моделирование является оптимальным методом построения качественной системы управления.

Модель Siemens-реактора

Математическая модель Siemens-реактора как ОУ должна описывать процесс осаждения кремния, реализуя динамические связи между основными технологическими переменными с учетом радиального профиля температуры в кремниевом стержне. В основу разработки была положена ранее предложенная модель [8]. Используемый в работе [8] «зонный» подход расчета профиля температуры кремниевых стержней T не позволяет проведения качественного параметрического синтеза САУ из-за пилообразного изменения основных выходных технологических переменных. Этот недостаток был устранен заменой уравнений теплового баланса кремниевого стержня на нестационарное уравнение теплопроводности:

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

где r – радиальная координата, м; ρ – плотность кремния, кг/м³; c , λ и σ – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К), теплопроводность, Вт/(м·К) и электропроводность, 1/(Ом·м) кремния соответственно; J – плотность тока, А/м², определяемая величиной силы электрического тока резистивного нагрева стержня – I , А.

Начальное условие для этого уравнения: $T(t_i, r(t_i)) = T(t_{i-1}, r(t_{i-1}))$, граничные условия:

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

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

где r_s – радиус стержня, м; h – коэффициент конвекции и теплопередачи, Вт/(м²·К); ε – степень черноты кремния; σ_B – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м²·К⁴); T_g и T_w – температура парогазовой смеси и стенки реактора, К.

Вследствие преобладания в парогазовой смеси водорода (порядка 95 %), влияние его на конвективный теплоперенос является преобладающим, и коэффициент конвекции h может быть определен по выражению [9]:

$$h = \frac{\lambda_{H_2}}{L} 0,0296 Re^{0,8} Pr^{0,43},$$

где L – определяющий размер (длина стержня); λ_{H_2} – теплопроводность H_2 , Вт/(К·м); Re – число Рейнольдса; Pr – число Прандтля.

Условно поделив стержень на n цилиндрических зон, рассчитывалась величина электрического сопротивления стержня R :

$$R = \left(\sum_{i=1}^n (\sigma(T_j)^{-1} [L / \pi (r_j^2 - r_{j-1}^2)])_i \right)^{-1}.$$

Математическая модель была реализована в MATLAB®/Simulink. Решение дифференциальных уравнений теплового баланса осуществлялось с использованием встроенного решателя «pdepe» [10].

Структурный синтез САУ

С целью компенсации существенной нестационарности ОУ был выбран метод адаптивного управления, что требует определения текущих значений диаметра d и температуры стержней T при построении канала управления «ток-температура».

На этапе структурного синтеза САУ были проведены исследования на разработанной модели Siemens-реактора нескольких вариантов систем с применением экспериментально определенных зависимостей $T=f_T(R)$, $d=f_d(R, T)$ и полосовых фильтров сигнала измеряемого электрического сопротивления стержней R для выделения диапазона частот соответствующих T и d . Обнаружено, что подобные системы обладают низкой грубостью и устойчивостью, т. к. имеют сильную зависимость от параметров функций $f_T(R)$ и $f_d(R, T)$, приводящей не только к большой статической ошибке, но и к снижению (вплоть до потери) устойчивости управления. В результате было решено отказаться

от построения контура управления температурой стержней по каналу «ток-температура», и выбрать в качестве управляемой переменной – электрическое сопротивление стержней.

Разработанная структурная схема адаптивной САУ с идентификационным методом настройки параметров регулятора была представлена в работе [4]. Используемая в алгоритме управления [4] процедура коррекции скорости осаждения кремния имеет жесткую зависимость от химического состава парогазовой смеси в реакторе, что снижает его универсальность. Для повышения гибкости и универсальности алгоритма управления, предлагается использование экстраполятора 1-го порядка при расчете текущего значения диаметра кремниевых стержней, а также исключение из структуры блоков программного изменения диаметра стержней и значения тока через них, рис. 1.

Представленная структура САУ имеет адаптацию параметров регулятора. Контур управления температурой стержней по сигналу рассогласования косвенно-рассчитанного электрического сопротивления стержней R_p и измеренного сопротивления ϵ_R формирует задающее воздействие величины тока резистивного нагрева I . Адаптация параметров регулятора основана на косвенном расчете текущего значения диаметра стержня d_p . Величина диаметра стержней также используется для расчета значений расходов исходных компонентов G_C , G_H обеспечивающих необходимые плотность подачи SiHCl_3 – q и мольное отношение $\text{H}_2/\text{SiHCl}_3$ – N .

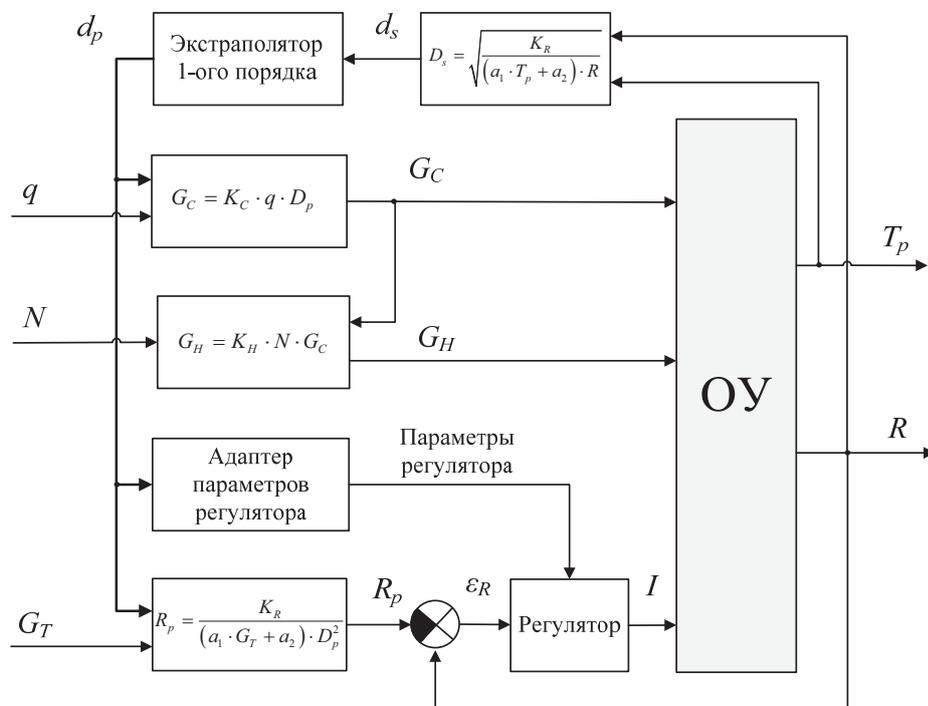


Рис. 1. Структурная схема САУ Siemens-реактора: N – мольное отношение $\text{H}_2/\text{SiHCl}_3$; q – плотность подачи SiHCl_3 , $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; G_T – уставка температуры стержней, $^\circ\text{C}$; d_s , d_p – расчетное и экстраполированное значения диаметра стержней, соответственно, м ; G_C , G_H – массовый и объемный расходы SiHCl_3 и H_2 соответственно, $\text{кг}/\text{ч}$, $\text{м}^3/\text{ч}$; a_1 , a_2 , K_R , K_C , K_H – коэффициенты; R_p , R – расчетное и измеренное значения электрического сопротивления стержней, Ом ; ϵ_R – сигнал рассогласования между R_p и R , Ом ; I – значение силы тока через стержни, А ; T_p – температура стержней по показаниям пирометра, $^\circ\text{C}$

Внешний контур по данным электрического сопротивления стержней R и их температуры T_p обеспечивает коррекцию косвенно-рассчитываемых величин, и позволяет повысить устойчивость и грубость САУ к изменению параметров ОУ, сохраняя при этом высокую чувствительность к возмущениям. Использование экстраполятора 1-го порядка при расчете текущего значения d_p позволяет адаптировать расчет R_p к реальным условиям изменения диаметра стержней d . Принцип работы экстраполятора представлен на рис. 2.

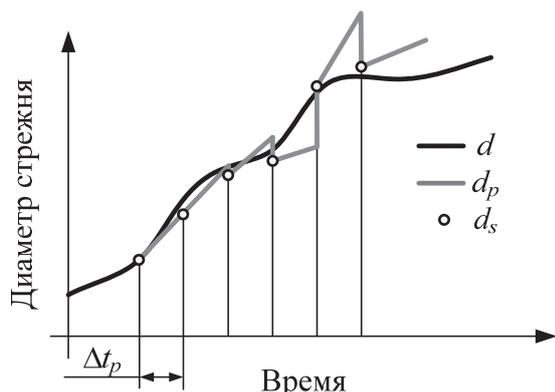


Рис. 2. Принцип работы экстраполятора по диаметру: d , d_p , d_s – реальное, расчетное и экстраполированное значения диаметра стержня; Δt_p – период опроса пирометра

Параметрический синтез САУ

Результаты вычислительных экспериментов по исследованию переходных процессов показали, что при изменении значений тока в пределах 10%-й нелинейности статической характеристики «ток-сопротивление» ОУ может быть описан инерционным звеном 1-го порядка без запаздывания с погрешностью менее 1%. Это в свою очередь говорит о целесообразности использования пропорционально-интегрального (ПИ) закона управления. Вследствие роста диаметра стержней передаточная функция ОУ характеризуется множеством $\{W(s)\}$. Представив в рабочей точке $W(s)$ как произведение передаточной функции линеаризованного объекта

$W_{lin}(s)$ и статической характеристики нелинейной части $F(\Delta I)$, зависящей от величины тока резистивного нагрева стержней, можно записать:

$$\{W(s)\} = \left\{ \frac{K_{lin}}{T_{lin}s + 1} F(\Delta I) \right\},$$

где K_{lin} , T_{lin} – коэффициент передачи и постоянная времени объекта соответственно.

Для компенсации нелинейности ОУ потребовалось решение задачи параметрического синтеза регулятора для линеаризованного объекта и определения передаточной функции звена линеаризатора $F^{-1}(\Delta I)$.

С целью линеаризации ОУ были проведены исследования переходных процессов по каналу «ток-сопротивление» в n рабочих точках, соответствующих различным диаметрам, считая объект квазистационарным. Нелинейность объекта не позволяет напрямую определить K_{lin} и T_{lin} . В каждой рабочей точке можно определить только следующие значения в зависимости от приращения тока ΔI : $f_k(\Delta I) = K_{lin} F_k(\Delta I)$ и $f_T(\Delta I) = T_{lin} F_T(\Delta I)$. Результаты расчетов представлены на рис. 3.

В j -й рабочей точке для различных ΔI найденные значения $\{f_{K,j}(\Delta I)\}$ были аппроксимированы линейными зависимостями: $f_{K,j}(\Delta I) \approx k_{K,j} \Delta I$. Пренебрегая нелинейностью менее 10% для соответствующего диапазона $\{f_{K,j}(\Delta I)\}$, были получены коэффициенты передачи объекта по каналу «ток-сопротивление»:

$$K_{lin,j} = \frac{f_{K,j}(\Delta I)}{F_{K,j}(\Delta I)} \approx \frac{k_{K,j} \Delta I}{k_{F_{K,j}} \Delta I} = k_j.$$

Постоянная времени объекта, описываемого инерционным звеном 1-го порядка без запаздывания с уже известным коэффициентом передачи K_{lin} , определялась путем аппроксимации кривой переходного процесса по каналу «ток-сопротивление». Результаты расчетов K_{lin} и T_{lin} представлены на рис. 4.

Расчет параметров ПИ-регулятора (K_R – коэффициент усиления, T_I – постоянная времени интегрирования) в различных рабочих точках проводилась методами динамической компенсации:

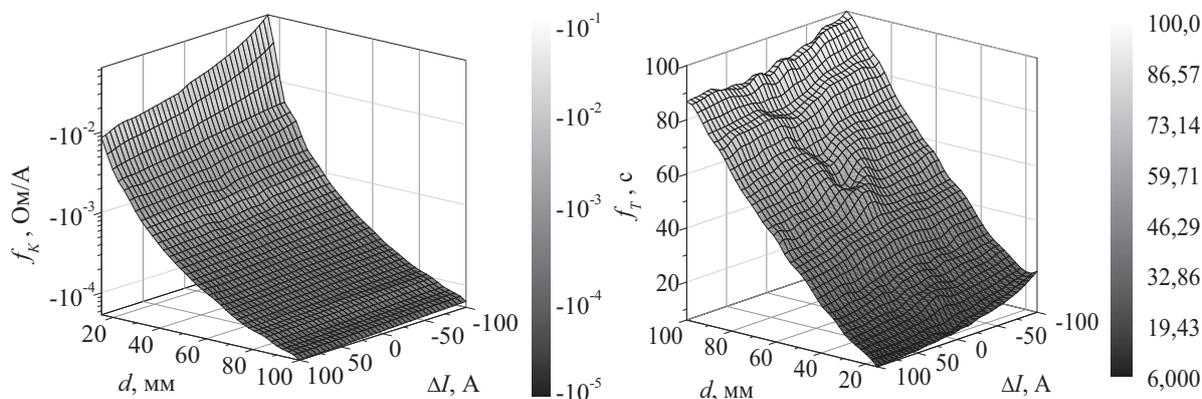


Рис. 3. Зависимость $f_k(\Delta I)$ и $f_T(\Delta I)$ от ΔI при различных диаметрах стержня d

- $K_R = T_{lin} \cdot (K_{lin} T_z)^{-1}$, $T_I = T_{lin}$, где T_z – необходимое быстродействие контура управления, с; и оптимального модуля [11]:
- $K_R = (6T_{lin}^3 + 6T_{lin}^2 + 3T_{lin} + 1) / (4K_{lin}(3T_{lin}^2 + 3T_{lin} + 1))$,
 $T_I = (6T_{lin}^3 + 6T_{lin}^2 + 3T_{lin} + 1) / (6T_{lin}^2 + 6T_{lin} + 2)$.

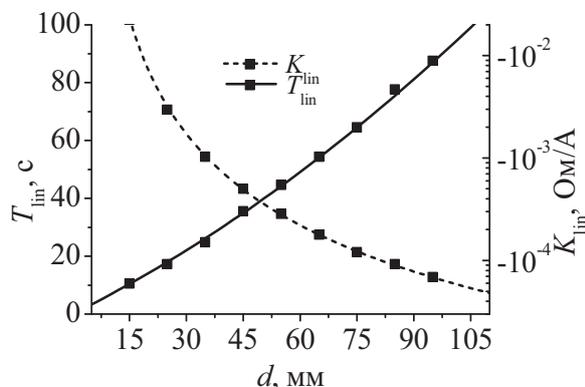


Рис. 4. Зависимость коэффициента передачи K_{lin} и постоянной времени линейризованного объекта T_{lin} от диаметра стержня d

Сравнение прямых показателей качества управления (динамического коэффициента регулирования и времени регулирования) показало, что ре-

гулятор настроенный методом оптимального модуля обеспечивает лучшие показатели качества управления.

Рассчитанные параметры настройки ПИ-регулятора методом оптимального модуля были аппроксимированы аналитическими зависимостями, что позволило использовать непрерывную адаптацию параметров регулятора контура управления температурой стержней по косвенно-рассчитываемым значениям их диаметра.

При синтезе контура управления было выявлено, что показатели качества САУ при изменении K_{lin} и T_{lin} объекта на $\pm 20\%$ изменяются в пределах 15% . Это позволило считать отклонения параметров ОУ от линейризованного на $\pm 20\%$ допустимым. Так как нелинейность ОУ более 20% проявлялась лишь в области малых диаметров стержней и недопустимых для них приращений тока ΔI (рис. 6), это позволило сделать обоснованный вывод о нецелесообразности реализации звена, компенсирующего нелинейность ОУ (линеаризатора).

Дополнительные вычислительные эксперименты позволили определить оптимальное значение периода опроса равного 600 с при периоде квантования по времени в контуре сопротивления не более 30 с.

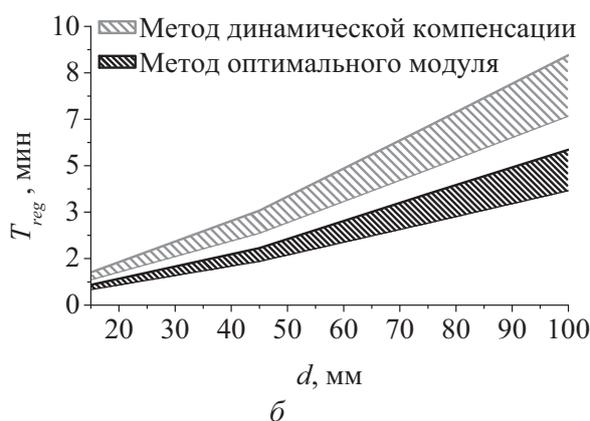
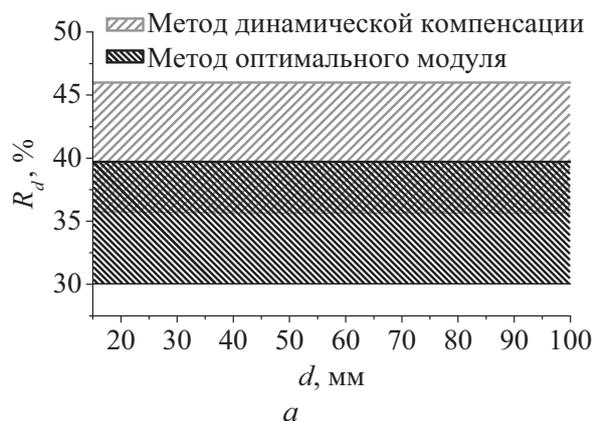


Рис. 5. Сравнение прямых показателей качества управления ПИ-регулятора, настроенного различными методами: а) время регулирования, T_{reg} ; б) динамический коэффициент регулирования, R_d

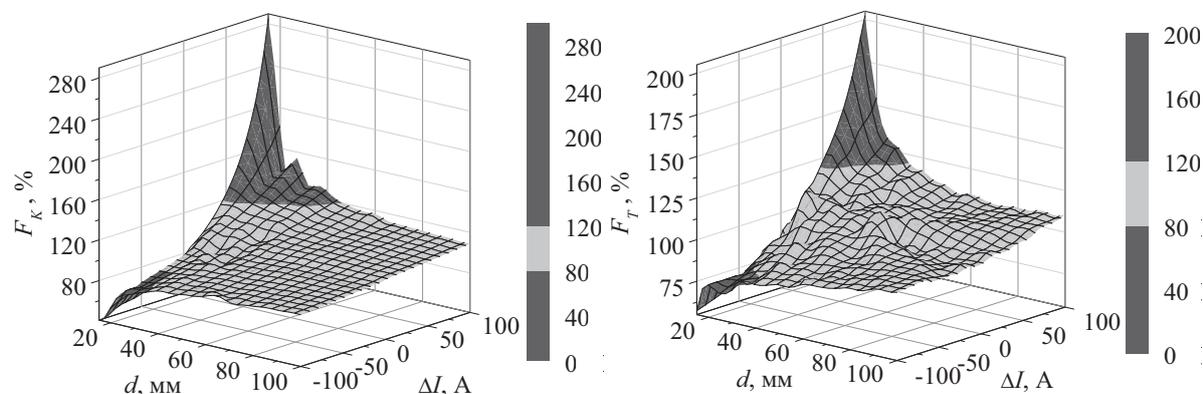


Рис. 6. Зависимость F_k и F_T от ΔI при различных диаметрах стержня d

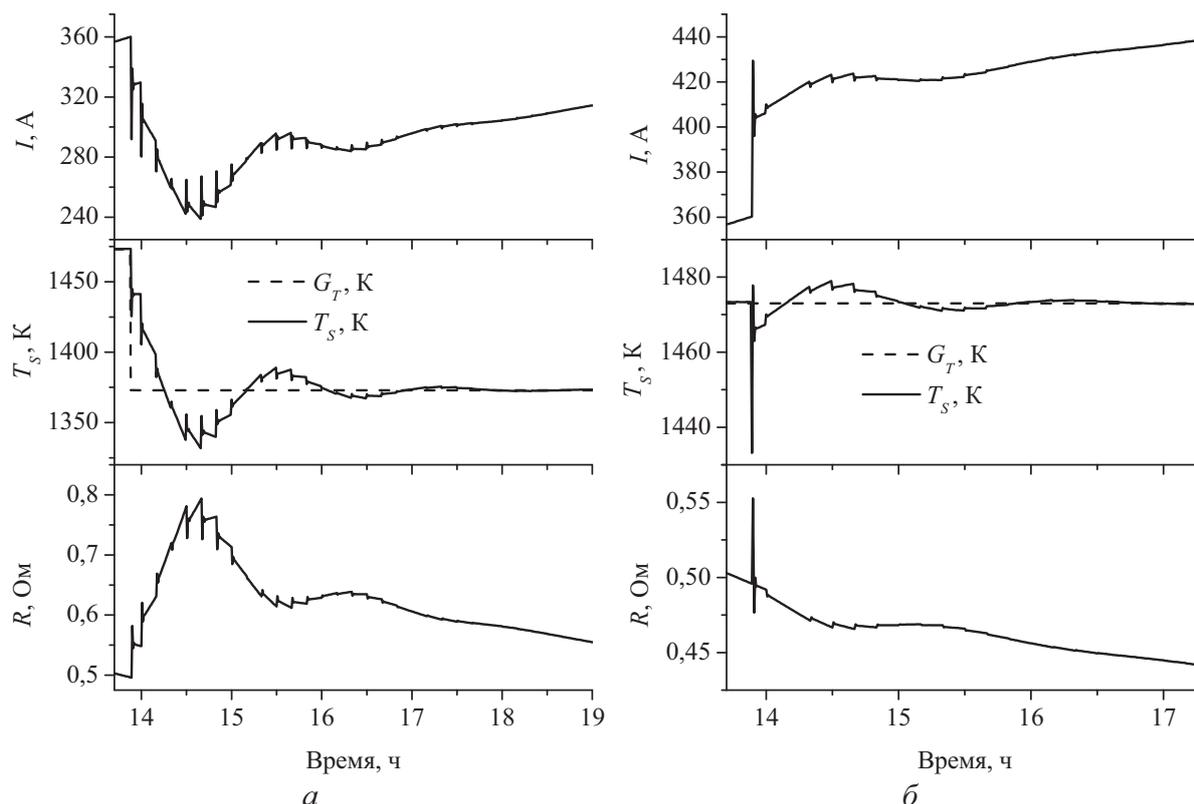


Рис. 7. Временные диаграммы основных переменных при исследованиях переходных процессов, диаметр стержня 33 мм: а) по управлению; б) по возмущению

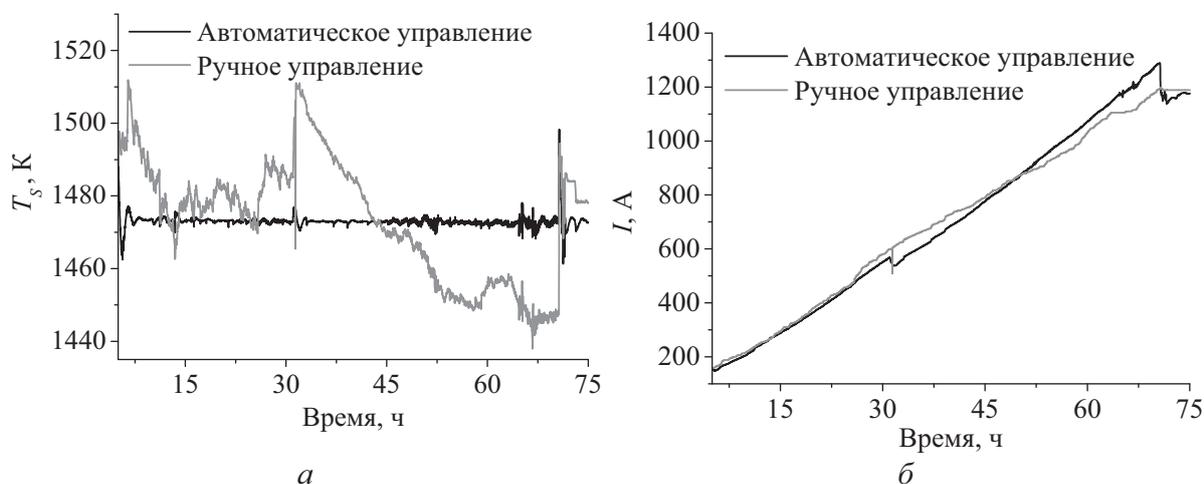


Рис. 8. Временные диаграммы основных переменных при сравнении управления процесса в ручном и автоматическом режиме: а) температура поверхности стержня, T_s ; б) ток секции стержней, I

Исследования САУ

Устойчивость, качество и грубость САУ исследовались методом сравнительного анализа переходных процессов при ступенчатых воздействиях по возмущению и управлению в различных рабочих точках. В качестве возмущающего воздействия использовалось ступенчатое изменение объемного расхода водорода с 100 до 400 м³/ч. Исследование переходных процессов по управлению осуществлялось ступенчатым изменением «уставки» температу-

ры стержней с 1473 до 1373 К. Пилообразное изменение расчетных значений обусловлено коррекцией работы экстраполятора в контуре адаптации, рис. 7.

В диапазоне изменения диаметра кремниевых стержней 30...90 мм время регулирования $T_{рег}$ в переходных процессах по управлению и возмущению составило 3,2...2,1 и 1,8...1,2 ч соответственно. При этом величина перерегулирования σ и динамический коэффициент регулирования R_d изменялись в диапазоне 65...47,4 и 80...50 % соответственно.

Методом математического моделирования было установлено, что разработанная САУ позволяет снизить среднеквадратичное отклонение температуры стержней T_s от требуемого значения G_T по сравнению с ручным управлением на порядок с 15,2 до 1,5 К, см. рис. 8.

Заключение

Представлены результаты синтеза адаптивной САУ Siemens-реактором получения поликристаллического кремния. В качестве управляемой переменной выбрано электрическое сопротивление кремниевых стержней. Предложена структурная схема САУ, позволяющая реализовать непрерывную адаптацию параметров настройки регулятора основного

контура, а также раздельное управление температурой кремниевых стержней и расходами исходных реагентов.

Приведены результаты исследований разработанной системы на ее компьютерной модели, показано, что предлагаемая САУ позволяет на порядок снизить среднеквадратичное отклонение температуры стержней от нормы по сравнению с ручным управлением.

Ведутся работы по внедрению САУ на одном из производств поликристаллического кремния РФ.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 годы».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Bettayeb M., Shah S.F. State of the art advanced process control // 7th Intern. Conf. on Development and application systems. – Sučea-va, May 27–29 2004. – Sučea-va, Romania, 2004. – P. 1–5.
- Чаки Ф. Современная теория управления. Нелинейные, оптимальные и адаптивные системы / под ред. Н.С. Раймона. – М.: Мир, 1975. – 424 с.
- Фалькевич Э.С., Пульнер Э.О., Червоний И.Ф. и др. Технология полупроводникового кремния. – М.: Металлургия, 1992. – 408 с.
- 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. – 2009. – Т. 315. – № 5. – С. 70–74.
- Viganò L., Vallerio M., Manenti F., Lima N.M.N., Linan L.Z., Manenti G. Model predictive control of a CVD reactor for production of polysilicon rods // Chemical engineering transactions. – 2010. – V. 21. – P. 523–528.
- Brenemann W.C., Dawson H.J. A Comparison of the Trichlorosilane and Silane Routes in the Purification of Metallurgical Grade Silicon to Semiconductor Quality // Silicon for the Chemical Industry IV, Geiranger, Norway, June 3–5, 1998, Ed. H.A. Iye, H.M. Rong, L. Nygaard, G. Schlusser, J.Kr. Tuzet. – Trondheim, Norway, 1998. – P. 101–112.
- Чернявский Л.И., Титов В.А., Сысоев С.В., Рыженков С.В. Термодинамическое моделирование осаждения кремния из газовой фазы системы Si-Cl-H // Неорганические материалы. – 2009. – Т. 45. – № 5. – С. 517–521.
- 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.
- Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергия, 1975. – 488 с.
- Функции ядра MATLAB для решения одномерных нестационарных PDE // Консультативный центр MATLAB компании Softline. 2011. URL: <http://matlab.exponenta.ru/pde/book7/index.php> (дата обращения: 25.10.2010).
- Гурецкий Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием. – М.: Машиностроение, 1974. – 327 с.

Поступила 17.07.2011 г.