

## АДАПТИВНЫЙ КРИТИЧЕСКИЙ РЕГУЛЯТОР СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ТРАВЛЕНИЯ ПОЛОСОВОЙ СТАЛИ

---

Предлагается подход к реализации цифровых регуляторов в системах управления процессом травления полосовой стали, основанный на применении моделей и методов адаптивного критического управления, позволяющих учесть характер неопределенностей объектов рассматриваемого класса. Результаты моделирования полученных цифровых алгоритмов (с использованием программной среды SCILAB) подтверждают снижение ошибки отклонения характеристик полосовой стали на выходе линии травления от заданных значений.

### 1. Введение

Одним из перспективных путей повышения эффективности непрерывных широкополосных станов прокатки является совершенствование систем автоматического управления ключевыми стадиями, определяющими качество выпускаемой продукции – стального проката [1]. К их числу относится технологическая линия травления полосовой стали, формирующая важные физико-механические характеристики проката. Эта линия функционирует в специфических условиях неопределенности, существенно осложняющих управление режимом травления. Часть переменных (температура конца прокатки и травильного раствора) измеряются с большой погрешностью, а некоторые возмущающие переменные и факторы (точный химсостав травильного раствора, забивка шламом углублений на поверхности проката) вообще не поддаются измерению и контролю. Наконец, существуют измеряемые возмущающие переменные (толщина и скорость движения полосы), которые оказывают существенное влияние на динамические характеристики объекта. Эффективное управление такими объектами возможно на основе математического моделирования объекта и системы управления. Математические модели должны быть нечувствительными к большим помехам и погрешностям измерения, легко адаптироваться к часто меняющимся динамическим характеристикам линии травления и удовлетворять принятым условиям адекватности. Указанным требованиям наиболее полно удовлетворяют адаптивные критические методы контроля, идентификации и управления динамическими объектами, функционирующими в условиях существенной неопределенности о характеристиках объекта и окружающей среды на основе объединения принципов теории адаптивного и критического управления [2]. При использовании критических регуляторов в системах микроконтроллерного управления процессом травления последние также приобретают аналогичные полезные свойства, отсутствующие в существующих системах управления и приводящие к снижению качества полосовой стали. Такой подход позволит в значительной мере устранить недостатки, присущие традиционным системам управления, построенным на основе детерминированных или статистических моделей.

Применение микроконтроллерной системы нагрева рабочих сред травильных ванн в высокоэффективных управляемых энергоблоках, используемых в технологических линиях травления полосовой стали, позволяет отказаться от высокопотенциального перегретого пара и перейти к использованию низкопотенциального насыщенного пара, что в свою очередь значительно уменьшает потребление природного газа при выполнении этого технологического процесса.

*Целью данной работы* является решение задачи синтеза цифровых регуляторов в системах управления процессом травления полосовой стали, основанным на применении моделей и методов адаптивного критического управления, позволяющих учесть характер неопределенностей объектов рассматриваемого класса.

## 2. Принцип критического управления динамическими объектами

Рассмотрим динамический SISO-объект, функционирующий в замкнутой системе управления  $S_D(P,C)$ , описываемый разностным уравнением

$$A(q)y(k) = q^{-d}B(q)u(k) + w(k), \quad (1)$$

где полиномы  $A(q) \in R[q,n]$   $a_0 = 1$ ,  $B(q) \in R[q,m]$ ;  $d$  – время чистого запаздывания;  $y$ ,  $u$  и  $w$  – выходной, управляющий и возмущающий сигналы соответственно;  $C: (y^*, y) \rightarrow u$  – аналитический закон управления;  $y^*$  – внешнее задающее воздействие;  $P$  – совокупность параметров закона управления.

В общем случае критическое управление динамическими нестационарными объектами может быть реализовано в условиях их нормального функционирования и существенной априорной и текущей неопределенности о возмущениях, действующих на объект с использованием обучающих моделей и при наличии различного типа ограничений (на амплитуды, скорость изменения, энергию) управляющих и выходных сигналов.

При этом предполагается, что целью управления объектом вида (1) является нахождение управляющего воздействия  $u(k)$ , поддерживающего выполнение в реальном времени системы целевых неравенств

$$J_i^c(p) \leq \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

где  $p \in P$  – параметры закона управления, принадлежащие ограниченному множеству  $P$ ;  $\varepsilon_i$  – некоторые границы (пороговые значения) целевых функций, полученные на основе параметрического и структурного синтеза адаптивной замкнутой системы управления.

В настоящей работе рассматривается задача критического управления динамическим объектом (1) в предположении, что параметры объекта априори неизвестны и должны уточняться в реальном времени по ходу функционирования системы управления. При этом относительно объекта принимаются стандартные предположения, применяемые в теории адаптивного управления: нули полинома лежат вне единичного круга; верхняя граница порядков полиномов  $A(q)$  и  $B(q)$  известна; время чистого запаздывания  $d$  также известно. Первое предположение обеспечивает устойчивость замкнутой системы критического управления; второе позволяет избежать нежелательный эффект переобучения, достаточно часто возникающий в процессе адаптивной идентификации; третье – обеспечивает необходимое условие  $b_0 \neq 0$ , делающее возможным синтез закона управления [3].

Алгоритм критического управления состоит из двух последовательных шагов: идентификации параметров объекта и расчета управляющих воздействий.

В качестве процедур идентификации можно использовать модификации рекуррентного метода наименьших квадратов либо проекционные алгоритмы, в той или иной степени связанные с квадратичными критериями. В связи с этим возникает необходимость синтеза адаптивных алгоритмов идентификации, не связанных ни с какими статистическими предпосылками, обладающих высокой скоростью сходимости, вычислительной простотой и пригодных для работы в реальном времени в контуре критической системы управления динамическим объектом.

Рассмотрим полином

$$G(q) = 1 - \Delta A(q), \quad (3)$$

где  $G(q) = g_1 q^{-1} + g_2 q^{-2} + \dots + q^{-n-1}$ , и преобразуем уравнение объекта (1) к виду

$$y(k) = \Theta^T \psi(k-1) + \Delta w(k), \quad (4)$$

здесь  $\Theta = (g_1, g_2, \dots, g_{n+1}, b_0, b_1, \dots, b_m)^T$ ,  $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$ ;  $\Delta w(k) = w(k) - w(k-1)$ ,

$$\psi(k-1) = (y(k-1), y(k-2), \dots, y(k-n-1), \Delta u(k-d), \Delta u(k-d-1), \dots, \Delta u(k-d-m))^T.$$

Параметры уравнения (4) уточняются с помощью одного из адаптивных алгоритмов идентификации. При этом в дальнейших расчетах вместо этого уравнения используется настраиваемая модель

$$\hat{y}(k) = \hat{\Theta}^T(k-1) \psi(k-1). \quad (5)$$

Если параметры объекта априори известны и неизменны, задача критического управления может быть решена с помощью регулятора, удовлетворяющего уравнению

$$\Delta F(q)B(q)u(k) = -E(q)y(k), \quad (6)$$

где оценки полиномов  $F(q) \in R[q, d-1]$  с  $f_0 = 1$  и  $E(q) \in R[q, n]$  можно получить с помощью следующих систем рекурсивных уравнений:

$$\begin{cases} \hat{f}_1(k) = \hat{g}_1(k); \\ \hat{f}_2(k) = \hat{g}_2(k) + \hat{f}_1(k)\hat{g}_1(k-1); \\ \vdots \\ \hat{f}_{d-1}(k) = \hat{g}_{d-1}(k) + \hat{f}_1(k)\hat{g}_{d-1}(k-1) + \dots + \hat{f}_{d-2}(k)\hat{g}_1(k-d+2) \end{cases} \quad (7)$$

и

$$\begin{cases} \hat{e}_0(k) = \hat{g}_d(k) + \hat{f}_1(k)\hat{g}_{d-1}(k-1) + \dots + \hat{f}_{d-1}(k)\hat{g}_1(k-d+1); \\ \hat{e}_1(k) = \hat{g}_{d+1}(k) + \hat{f}_1(k)\hat{g}_d(k-1) + \dots + \hat{f}_{d-1}(k)\hat{g}_2(k-d+1); \\ \vdots \\ \hat{e}_n(k) = \hat{f}_{d-1}(k)\hat{g}_{n+1}(k-d+1). \end{cases} \quad (8)$$

На основании полученных оценок на этом же этапе решается полиномиальное уравнение

$$\hat{F}(q, k)(1 - \hat{G}(q, k)) + \hat{E}(q, k)q^{-d} = 1, \quad (9)$$

где  $\hat{F}(q, k)$ ,  $\hat{G}(q, k)$ ,  $\hat{E}(q, k)$  – оценки полиномов, полученные в соответствии с зависимостями (7) и (8) к  $k$ -му моменту времени;  $\hat{f}_0(k) = 1$ .

Адаптивный критический регулятор  $C_R^k$  реализуется на основе закона управления, в котором неизвестные параметры объекта заменены оценками, полученными на предыдущем шаге, т.е.

$$\hat{E}(q, k)y(k) + \hat{F}(q, k)\hat{B}(q, k)\Delta u(k) = 0,$$

при этом  $d$ -шаговый прогноз выходного сигнала объекта имеет вид

$$\hat{y}(k+d) = \hat{E}(q, k)y(k) + \hat{F}(q, k)\hat{B}(q, k)\Delta u(k),$$

где используются полученные выше оценки  $\hat{E}(q, k)$ ,  $\hat{F}(q, k)$ ,  $\hat{B}(q, k)$ .

При этом предполагается, что параметры закона управления априори неизвестны и непредсказуемым образом могут меняться во времени, а внешние возмущения  $w(k)$  имеют неизвестный характер (стохастический, детерминированный, хаотический) и ограничены по амплитуде. Цель управления считается достигнутой, если удовлетворяются все  $n$  неравенств вида (2).

В работе [3] доказаны следующие свойства адаптивного критического регулятора:

– если входные и выходные сигналы объекта  $u(k)$  и  $y(k)$  являются ограниченными последовательностями, то ошибка идентификации также является ограниченной последовательностью:

$$\limsup_{k \rightarrow \infty} |e(k)| \leq \delta; \quad (10)$$

– выходной сигнал объекта ограничен условием

$$\limsup_{k \rightarrow \infty} |y(k)| \leq \|\hat{F}(q)\| \delta, \quad (11)$$

т.е. обеспечивается устойчивость замкнутой системы, выходной сигнал которой асимптотически ограничен «трубкой»  $\pm \|\hat{F}\| \delta$ .

### 3. Моделирование критического цифрового регулятора системы управления процессом травления

Общая схема системы управления технологическим процессом травления полосовой стали с использованием последовательно соединенных высокоэффективных управляемых энергоблоков содержит целый ряд локальных контуров микроконтроллерного регулирования. К наиболее важным из таких контуров относятся подсистемы управления температурой травильного раствора и поддержания заданного уровня его кислотности, определяемого суммарным влиянием целого ряда факторов (в первую очередь концентрацией серной кислоты  $H_2SO_4$  и солей  $FeSO_4$ , находящихся в травильном растворе). При этом состав и температура раствора существенно влияют на конечный результат работы технологической линии травления – при недостаточном уровне кислотности на поверхности проката остается окалина, а при избыточном уровне снимается лишний слой металла и возникает отклонение толщины стальной полосы от заданной величины. В идеальном случае управление процессом травления на протяжении цикла обработки полосы должно обеспечивать поддержание графика, приведенного на рис. 1.

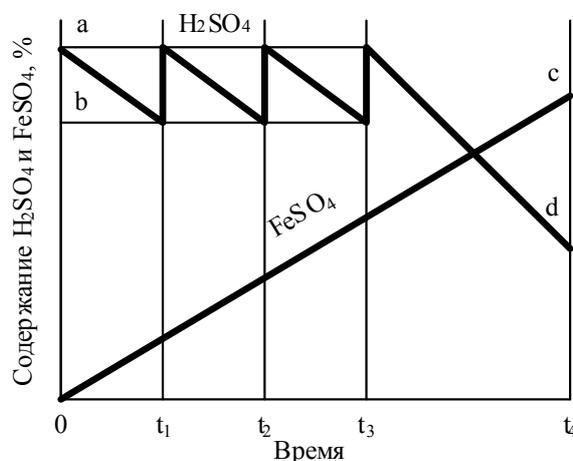


Рис. 1. Диаграмма изменения состава травильного раствора

В соответствии с рис. 1 концентрация кислоты в растворе (с начальным уровнем  $a\%$ ) не должна быть ниже уровня  $b\%$  (в противном случае темп работы линии будет существенно снижен), а в конце технологического цикла (к моменту  $t_4$ ) концентрации кислоты и соли должны составлять  $d\%$  и  $c\%$  соответственно. Ввиду наличия специфических неопределенностей, присущих рассматриваемому технологическому процессу, применение традиционных регуляторов не позволяет получить высокое качество управления режимами травления. В связи с этим целесообразным является разработка описанного выше критического регулятора для некоторых контуров системы управления процессом травления полосовой стали.

Исследования показали, что динамика влияния расхода кислоты ( $u(k)$ ) на плотность травильного раствора ( $y(k)$ ) может быть (для рассмотренной в модельном эксперименте технологической линии) описана ARMAX – моделью вида:

$$(1 + 1.9q^{-1} + 0.92q^{-2})y(k) = q^{-1}(1 + 0.85q^{-1})u(k) + w(k), \quad (12)$$

возмущаемой сигналом

$$w(k) = w(k-1) + 0.1 \text{sign } v(k), \quad (13)$$

где  $v(k)$  – дискретный белый шум с нулевым математическим ожиданием и ограниченной дисперсией.

В соответствии с описанным выше подходом было получено следующее уравнение критического регулятора:

$$u(k) = 0.9y(k) - 0.98y(k-1) - 0.92y(k-2) + 0.15u(k-1) + 0.85u(k-2), \quad (14)$$

приводящего к получению гарантированной точности идентификации и приемлемого уровня отклонения выходного сигнала от значений, определяемых технологическим режимом

травления. На рис. 2-4 представлены некоторые результаты моделирования работы синтезированного регулятора (с использованием программной среды SCILAB). В частности, на рис. 2 приведен график текущего отклонения плотности травильного раствора от задания, на рис. 3 показан характер возмущений, а рис.4 иллюстрирует процесс уменьшения нормы ошибки идентификации.

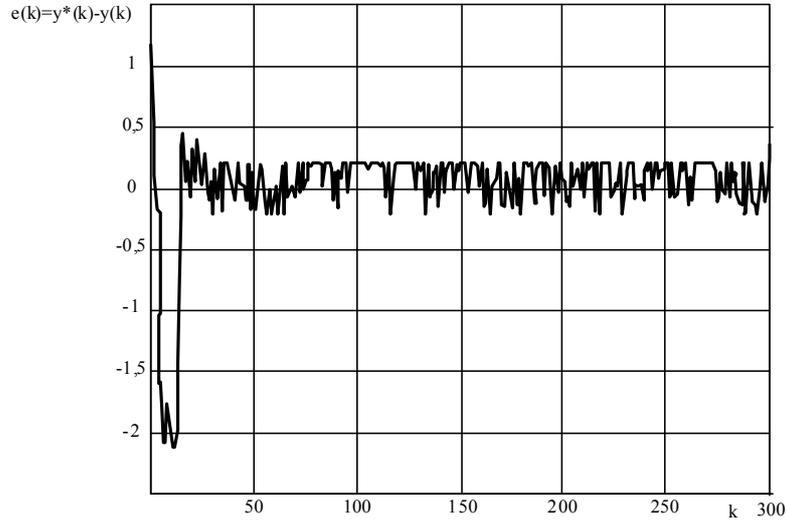


Рис. 2. Ошибка управления (текущее отклонение плотности травильного раствора от задания)

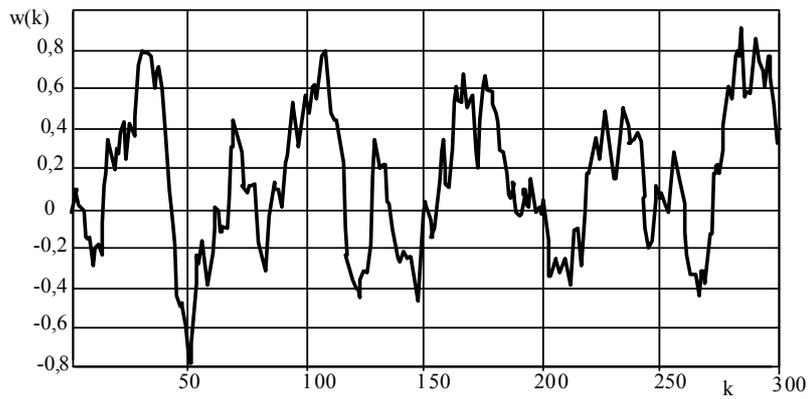


Рис. 3. Возмущающий сигнал системы управления

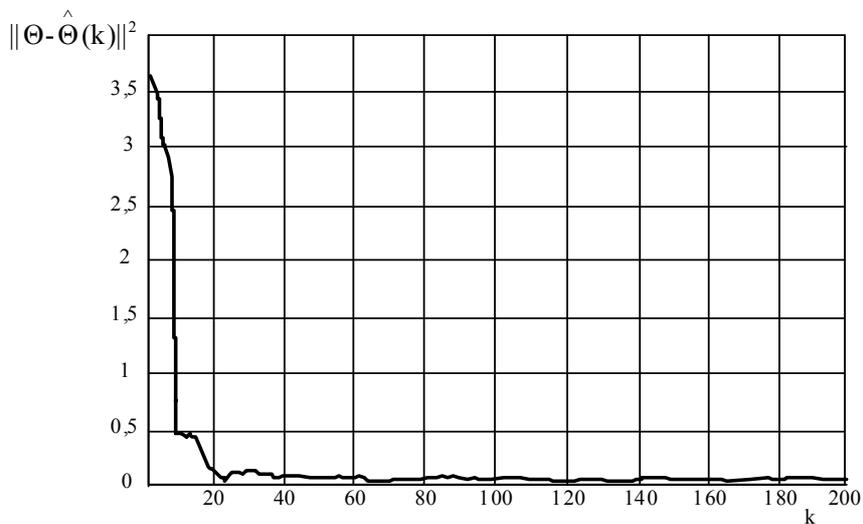


Рис. 4. Качество идентификации (изменение нормы ошибки  $\|\Theta - \hat{\Theta}(k)\|^2$ )

Синтезированная система управления удовлетворяет условиям (10) и (11) для значения  $\delta=0,05$ . Результаты моделирования подтверждают работоспособность предложенного критического адаптивного регулятора, что свидетельствует о возможности его практического использования в составе автоматизированной системы управления технологическими процессами травления полосовой стали.

#### 4. Выводы

*Научная новизна* полученных результатов заключается в модификации подхода к синтезу адаптивных критических регуляторов для цифровых систем управления с высоким уровнем неопределенности. Суть предложенной модификации состоит в применении рекурсивной процедуры пересчета параметров расширенной ARMAX – модели и последующем определении управляющих воздействий, гарантирующих ограниченность ошибки управления в соответствии с заданными условиями. При этом возмущения могут иметь различный характер (стохастический, детерминированный, хаотический) и быть ограничены лишь по амплитуде.

*Практическая значимость* заключается в теоретическом и экспериментальном подтверждении возможности и целесообразности применения адаптивных критических регуляторов для создания системы управления технологическим процессом травления полосовой стали с использованием последовательно соединенных высокоэффективных управляемых энергоблоков. В частности, в статье приведены результаты моделирования контуров критического управления температурой травильного раствора и поддержания заданного уровня его кислотности.

*Перспективным* представляется развитие теоретических и экспериментальных исследований по разработке критических регуляторов для общего технологического цикла прокатки полосовой стали на металлургических предприятиях.

**Список литературы:** 1. *Балюта С.Н.* Система управления широкополосным станом горячей прокатки / С.Н. Балюта, И.Н. Богаенко, В.Д. Йовбак // Промислова електроенергетика та електротехніка. 2009. №44. С.23-29. 2. *Skogestad S., Postlethwaite I.* Multivariable feedback control: analysis and design. Chichester: Wiley, 2005. 574 p. 3. *Тимофеев В.А., Илюнин О.О., Самер Лага.* Синтез модифицированного критического регулятора для управления нестационарными объектами // Вестник Херсонского национального технического университета. Херсон, 2010. №38. С.398-401.

*Поступила в редколлегию 17.08.2011*

**Самер Лага**, аспирант кафедры экономической кибернетики ХНУРЭ. Научные интересы: идентификация нелинейных систем, цифровое управление. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14.

**Тимофеев Владимир Александрович**, д-р техн. наук, заведующий кафедрой экономической кибернетики ХНУРЭ. Научные интересы: адаптивное управление стохастическими процессами, методы динамической оптимизации. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 70-21-354.

**Шамраев Анатолий Анатольевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры электронных вычислительных машин ХНУРЭ. Научные интересы: нейро-нечеткое управление, разработка и оптимизация микроконтроллерных систем. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 7021354.