УДК 669:658.011.54/.011.56

П.А.ПЕТРОВ
Металлургический факультет,
группа АПМ-М-00, ассистент профессора

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДСИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫМ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОМ С ОБОЖЖЕННЫМИ АНОДАМИ

Описано моделирование подсистемы управления алюминиевым электролизером с обожженными анодами. Поставлена задача и определены цели управления. Приводится математическое описание электролизера как объекта управления. Модель электролизера и подсистемы управления построена в пакете MatLab с использованием инструмента визуального моделирования Simulink.

Simulation of control subsystem of aluminium electrolyzer with baked anodes is described in article. A problem is set and control objects are defined. A mathematical description of the electrolyzer as a control object is given. A model of the electrolyzer and the control subsystem are worked out with the Matlab software package with application of the Simulink visual simulation toolbox.

Алюминий получают при электрохимическом разложении глинозема в расплаве электролита, основными компонентами которого являются криолит и фтористый алюминий, при температуре 955-965 °С. На катоде происходит восстановление ионов 3-валентного алюминия, а на угольном аноде – разряд кислородсодержащих ионов, в результате чего образуется CO и CO_2.

Температура и состав расплава, расстояние между анодом и катодом, форма рабочего пространства, уровни металла и электролита, электрические параметры влияют на эффективность процесса электролиза. Эти показатели можно оперативно регулировать изменением междуполюсного расстояния (МПР) и расхода загружаемого в электролизную ванну глинозема и фторида алюминия.

Поскольку в условиях промышленности контролируется только напряжение на электролизере и проходящий через него ток, то задача управления – найти закон управления, минимизирующий выбранный критерий качества (квадратичный интегральный критерий) и имеющий зависимость управляющих воздействий от измеряемых переменных. Цели управления – поддержание показателей процесса электролиза (температура расплава, концентрация растворенного глинозема, криолитовое отношение (КО) и междуполюсное расстояние) возле их оптимальных значений.

Математическая модель электролизера. Математическая модель электролизера и подсистемы управления выполнена с помощью инструмента визуального моделирования Simulink пакета MatLab.

Электролизер как объект управления может быть представлен в виде структуры из уравнений динамики и статики.

Рассмотрим модель объекта управления. В электролизной ванне происходят динамические изменения состава электролита, связанные с приходом и расходом веществ, составляющих электролит (глинозем, криолит, фториды алюминия, кальция, магния). В этом случае электролизер представляет собой инерционное звено первого порядка, описываемое уравнением материального баланса по *i*-му компоненту:

$$m_{el}\frac{dC_i}{dt}G_i - K_i K I_c \eta ,$$

где m_{el} – масса расплава электролита, кг; C_i – концентрация компонента в электролите, доли ед.; G_i – приход загружаемого компонента, кг/ч; K_i – коэффициент расхода компонента (алюминия), кг/кг; K – электрохимический эквивалент алюминия, кг/(А·ч); I_c – сила тока, А; η – выход по току, доли ед.

При составлении этих уравнений предполагается, что при вводе компонентов в электролит осадка не образуется, содержание их по всему объему электролита одинаково.

Теплообмен в электролизере имеет распределенный в пространстве характер. В системах управления электролизом отсутствуют распределенные контроль и управляющие воздействия, поэтому можно считать адекватной тепловой моделью электролизера модель с сосредоточенными параметрами:

$$m_{el}c_{el}\frac{dT}{dt}IU + V\sum_i \Delta H_i w_{ri} - V\sum_j \Delta H_i w_{rj} -$$

$$-\alpha F_m(T-T_m) - \sum_l K_i F_l (T-T_a),$$

где T – температура электролита, °С; c_{el} – теплоемкость электролита, кДж/(кг·К); U – греющее напряжение, В; V – объем электролита, м^3; ΔH – тепловой эффект реакции, кДж/кмоль; w_{ri} – скорость реакции, кмоль/(м^3·с); α – коэффициент теплоотдачи от жидкого электролита, кДж/(с·м^2·К); K – коэффициенты теплопередачи, кДж/(с·м·К); F – поверхности теплопередачи, м^2.

Дифференциальное уравнение баланса включает следующие слагаемые (слева направо): тепловой поток от электрической энергии постоянного тока; тепло экзотермических реакций, затраты энергии на эндотермические реакции; приток тепла к зоне плавления из зоны жидкого электролита; теплопотери через подину, анод и криолит-глиноземную корку, т.е. остальные поверхности.

В дифференциальном уравнении изменения МПР учитываются следующие величины (в метрах в секунду): скорость изменений уровня анодного массива за счет его расхода L_a и металла L_m, определяемые через производительность электролизера, скорость перемещения анода при управлении L_u:

$$\frac{dT}{dt}L_a - L_m + K_u L_u,$$

где K_u принимает значения –1; 0; 1.

Напряжение на электролизере U_r и проходящий через него ток связаны с переменными состояния электролизера через его сопротивление R и обратную ЭДС E:

$$U_r = I_c R + E, \quad \begin{cases} R = f_1(L, C_{\mathrm{Al}}, T); \\ E = f_2(C_{\mathrm{Al}}, T). \end{cases}$$

Уравнение измерений напряжения соответствует уравнению косвенных измерений переменных состояния электролизера.

Модель управляющего устройства. Рассмотрим модель управляющего устройства (УУ). В УУ по рабочему (измеренному) напряжению U_r и току серии рассчитывается приведенное напряжение U_{pr} (аналог псевдосопротивления):

$$U_{pr} = \frac{(U_r - E_n)I_{cn}}{I_c} + E_n.$$

Далее это напряжение и ток усредняются за различные интервалы времени с помощью фильтра скользящего среднего и низкочастотного фильтра первого порядка.

Дискретный фильтр скользящего среднего

$$y_{(k)} = y_{(k-1)} + 1/n(x_{(k)} - x_{(k-n)}).$$

Дискретный фильтр первого порядка

$$y_{(k)} = y_{(k-1)} + g(x_{(k)} - y_{(k-1)}),$$

где $y_{(k)}, y_{(k-1)}$ – текущее и предыдущее усредненное значение соответственно; $x_{(k)}, x_{(k-n)}$ – величины, подлежащие усреднению; g – настроечный коэффициент, $0 < g < 1$.

Кроме того, определяются скорости изменения V_{el} приведенного напряжения

и псевдосопротивления, которые необходимы для дальнейшего расширения алгоритма поддержания концентрации глинозема (реализация режима частого и редкого питания):

$$V_{el} = \frac{y_i - y_{i-1}}{\Delta t},$$

где $y_{(i)}, y_{(i-1)}$ – текущие и предыдущие величины соответственно.

В задаче стабилизации теплового режима (стабилизации электрического сопротивления электролизера) принят пропорциональный закон регулирования – продолжительность перемещения анода пропорциональна величине и знаку отклонения регулируемого параметра (приведенного напряжения) от задания. Также в законе управления учитывается зона нечувствительности и ограничение разовой длительности перемещения анода в одном направлении.

Необходимость стабилизации концентрации глинозема определяется требованиями к допустимому диапазону изменения концентрации глинозема в расплаве. Нижний предел соответствует концентрации, при которой возникает анодный эффект. Верхний предел – образование осадков. Поэтому наилучшая концентрация глинозема ≈ 4 %.

КО является важной переменной, характеризующей состав электролита. Снижение криолитового отношения приводит к уменьшению температуры кристаллизации электролита, а также благоприятно влияет на выход по току. При дальнейшем понижении КО уменьшается МПР и растет окисление алюминия углекислым газом. Таким образом, необходима стабилизация КО на оптимальном уровне (КО = 2,2 – 2,3 обеспечивает высокий выход по току и минимальный расход электроэнергии для электролизеров с обожженными анодами).

В задаче стабилизации концентрации глинозема и КО загрузка глинозема и фторида алюминия происходит через интервалы времени, определенные из уравнений балансов концентрации этих веществ.

Имитируется работа трех питателей глинозема. Питатели дозируют его последовательно в одном цикле через заданный интервал с точностью до 50 г. На данном этапе работы реализован так называемый базовый режим работы питателя. Принцип работы питателя фтористых солей тот же.

Выводы

1. Математическое моделирование процессов в электролизере с обожженными анодами позволяет изучать влияние каждого технологического параметра, определять последствия изменения любого показателя.

2. Совершенствование уравнений динамики тепловых и материальных потоков, учитывающих энергию химических превращений, изменение состава электролита, позволит получить более точную модель, отражающую происходящие в электролизере процессы.

Научный руководитель д.т.н. проф. Ю.В.Шариков