УДК 658.53/59-669.713

Д.М.Ханукаева, А.А. Гальнбек,
М.Я.Фитерман, А.Ю.Фирсов

АЛГОРИТМЫ КОСВЕННОГО ОЦЕНИВАНИЯ НЕИЗМЕРЯЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЛИЗА АЛЮМИНИЯ

Ввиду недостаточности оперативного технологического контроля процесса электролитического получения алюминия, его автоматизированное управление приходится базировать на методах косвенного оценивания неизмеряемых параметров. Разработан алгоритм оценивания одного из важнейших неизмеряемых параметров - текущей концентрации глинозема в расплаве - по измеряемым электрическим параметрам при их нелинейной связи.

Due to the insufficiently of prompt technological control of the process for electrolytic aluminium, its automated control has to be based on the methods of indirect estimation the unmeasurable parameters. The estimation algorithm of one the most important unmeasurable parameters - the current concentration of fused alumina, has been worked out based on measuring the electrical parameters which are nonlinear with respect to each other.

Важную роль в увеличении производства алюминия и повышении эффективности процесса получения алюминия электролизом криолитоглиноземных расплавов играет совершенствование методов контроля и управления.

Одним из важных условий достижения высоких технико-экономических показателей процесса производства алюминия является поддержание оптимального технологического режима электролиза, заключающегося в стабилизации основных технологических показателей: температуры электролита, его состава и электрического сопротивления, величины междуполюсного расстояния [2].

Существенной особенностью процесса электролитического получения алюминия как объекта управления является недостаточный объем оперативного технологического контроля за состоянием процесса. Одним из главных сдерживающих факторов в развитии методов и технических средств контроля тепловых, электрохимических и других характеристик процесса является отсутствие датчиков, способных надежно работать в

условиях чрезвычайной агрессивности расплава, высоких температур, мощных электромагнитных полей. Поэтому основным направлением повышения качества управления процессом электролиза алюминия является использование методов косвенного оценивания неизмеряемых параметров.

Современная теория управления располагает широким спектром методов оценивания, однако в отечественных АСУТП их применение не нашло широкого распространения. Основные причины, по-видимому, состоят в том, что в математическом аппарате оценивания недостаточно проработаны прикладные вопросы: упрощение строго оптимальных алгоритмов оценивания и их реализация в АСУТП, обеспечение необходимого объема априорной информации об объектах управления, настройка алгоритмов оценивания в промышленных условиях и т.д.

В связи с изложенным весьма актуальной представляется задача синтеза алгоритмов косвенного оценивания параметров процесса электролиза, позволяющих существенно повысить качество их стабилизации и, в первую очередь, могущих поддерживать технологически оптимальный концентрационный режим процесса электролиза.

Использование алгоритмов косвенного оценивания концентрации глинозема в электролите позволяет решить проблему недостатка оперативной информации о состоянии электролизера; применить новый принцип управления составом электролита, учитывающий текущее состояние электролизера; повысить качество стабилизации концентрации глинозема в электролите, что, в свою очередь, дает возможность оптимизировать процесс электролиза и снизить себестоимость производимой продукции - первичного алюминия.

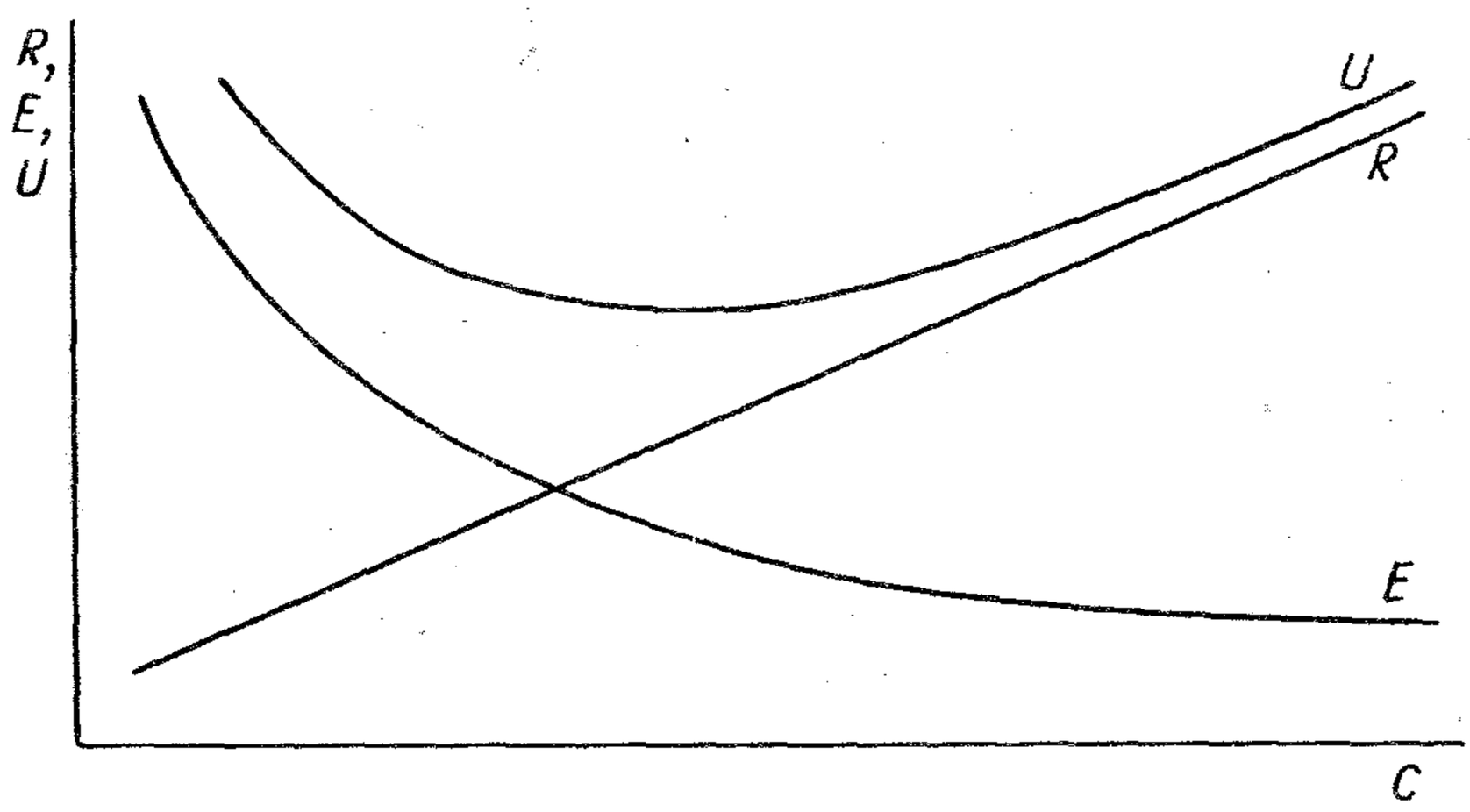
В настоящее время не существует методов непрерывного автоматического контроля содержания глинозема в электролите [1]. Методы прямого аналитического контроля содержания глинозема в криолитоглиноземных расплавах, требующие затрат времени на охлаждение, подготовку и анализ отобранной пробы, являются запаздывающими по отношению к моменту отбора пробы из электролизера и дискретными и потому непригемыми для использования в АСУТП электролиза алюминия. В связи с этим предложен ряд косвенных методов определения содержания глинозема, основанных на измерении величин, зависящих от концентрации глинозема в электролите (например, критической плотности тока вспомогательного анода, введенного в электролит; резонансной частоты звукового резонатора, помещенного на определенную глубину, или давления и состава отходящих газов под подошвой анода). Однако использование

этих методов сопряжено с существенными капитальными и эксплуатационными затратами на установку и обслуживание дополнительных устройств. Кроме того, этим методам присуща сравнительно высокая погрешность, обусловленная действием неконтролируемых факторов (температуры электролита, состояния рабочей поверхности анода, утечек газов и т.п.).

Попытки устранения перечисленных недостатков существующих методов привели к появлению еще одной, наиболее перспективной группы методов. Это косвенные методы оценки концентрации, основанные на связи этой переменной с параметрами электрического режима процесса электролиза, контроль которых трудностей не представляет.

При создании алгоритмов оценивания концентрации глинозема в электролите был применен ряд приемов, не использующихся не только в алгоритмах управления концентрацией глинозема, но и при синтезе алгоритмов оценивания в целом.

Использование методов косвенного оценивания становится возможным благодаря зависимости измеряемых параметров от оцениваемых. Электрические параметры процесса электролиза - напряжение и ток серии - контролируются автоматически и непрерывно. Известна зависимость напряжения от концентрации через сопротивление и обратную ЭДС (см.рисунок) [3]. В силу противоположных тенденций зависимости сопротивления и обратной ЭДС от концентрации, результирующая зависимость напряжения от концентрации является существенно нелинейной. На этот факт следует обратить особое внимание, поскольку именно нелинейность основного уравнения измерений делает невозможным применение стандартных



Зависимости сопротивления R, обратной ЭДС E и напряжения U от концентрации глинозема в электролите C

алгоритмов оценивания. В современной теории оценивания существует целый класс субоптимальных нелинейных фильтров, успешно применяемых при решении задач оценивания. Однако все эти фильтры получены для случая гладкого (монотонного) характера нелинейности. Для данного объекта основное уравнение измерений не только является экстремальным, но и достигает минимума в области номинальных значений концентрации. Поэтому обычно применяемая линеаризация в номинальной точке здесь недопустима.

При синтезе алгоритма оценивания концентрации глинозема в расплаве модель электролизера по каналу расход глинозема - концентрация глинозема в электролите представлена линейным динамическим звеном

$$X_{k+1} = X_k + aV_k + \xi_{x,k},$$

где X - оцениваемая переменная состояния (концентрация глинозема); V - управляющее воздействие (расход глинозема); ξ_x - дискретный белый шум интенсивностью Q_x, действующий на объект; a - коэффициент пропорциональности; k и $k+1$ - индексы текущего и последующего шагов измерений соответственно.

Основное уравнение измерений аппроксимируем квадратичной зависимостью напряжения на электролизере от концентрации глинозема в электролите, дополненной аддитивным белым шумом:

$$Z_k = \frac{1}{2} b X_k + \eta_k ,$$

где Z_k - измеряемый выход объекта (напряжение на электролизере) ; η_k - дискретный белый шум интенсивностью R, называемый шумом измерителя; b - коэффициент пропорциональности.

Для удобства последующих выкладок будем считать a и b равными единице.

Разработанный алгоритм отмечается следующими особенностями:

1) использование в качестве новой переменной ΔX_k случайного отклонения оцениваемой величины X_k от некоторой движущейся точки t_k ;

2) описание траектории движения точки t_k в расширенном пространстве состояний;

3) выбор детерминированного характера движения точки t_k из условия минимизации дисперсии ошибки прогноза оцениваемой величины.

Использование в качестве переменной не самой оцениваемой величины, а ее отклонения позволяет избежать неопределенности нахождения оцениваемой величины на той или другой ветви параболы, свойственной квадратичному уравнению измерений состояния объекта. Использование в качестве номинального значения не фиксированной, а движущейся точки, позволяет уменьшить ошибку оценивания, поскольку траектория движения этой точки выбирается из условия минимизации дисперсии ошибки прогноза. Этот критерий является основой нового метода двухшаговой оптимизации процесса оценивания, поскольку в стандартных алгоритмах минимизировалась лишь матрица дисперсии ошибки оценивания; на величину же матрицы дисперсии ошибки прогноза оцениваемой величины никаких ограничений не накладывалось.

Используя для записи новой переменной в терминах отклонений выражение $\Delta X_k = X_k - t_k$, получим уравнения измерений в виде

$$Z_k = \tfrac{1}{2}t_k^2 + t_k\Delta X_k + \tfrac{1}{2}\Delta X_k^2 + \eta_k \ ,$$

которое приведем к линейному виду с помощью метода расширения пространства состояний, заключающегося в замене нелинейного члена уравнения новой переменной $W_k = \Delta X^2$.

Уравнение динамики для детерминированной составляющей задается в виде

$$t_{k+1} = t_k + V_k - \Psi_k \ ,$$

где Ψ_k - некоторая функция времени, определяемая из условия минимума дисперсии ошибки прогноза оцениваемой величины,

$$\Psi_k = -\frac{P_{12}+2\Delta X_k Q_x}{2(P_{11}+Q_x)} \ ,$$

где P_{11} и P_{12} - элементы матрицы дисперсии ошибки оценивания.

Неизбежным следствием получения линейного уравнения измерений расширением пространства состояний является усложнение матрицы интенсивности шумов, действующих на объект. Шумы новой и старой переменных становятся коррелированными. Кроме того, шум новой переменной W не является

гауссовским. Однако мы имеем гарантию структурной устойчивости фильтра оценивания. Нужно отметить, что при определении матрицы интенсивности шумов, действующих на объект, был принят ряд допущений. В частности, допущение о возможности замены неизвестных переменных состояния их оценками, а квадратов шумов - их интенсивностями, что, строго говоря, верно лишь для усредненных значений.

В силу перечисленных выше особенностей, было бы наиболее точно назвать разработанный метод преобразования уравнения измерений методом квазилинеаризации.

Полученный алгоритм позволил решить задачу оценивания неизмеряемой величины при нелинейном (экстремальном) характере зависимости измеряемых переменных от оцениваемых. При этом сохраняются структурная устойчивость, относительная простота и необходимое в задачах управления быстродействие.

Возможность получения необходимой информации позволила решить задачу синтеза алгоритма управления концентрацией глинозема с обратной связью по отклонению и получить более совершенную систему управления по сравнению с использующейся в отечественной практике системой управления концентрацией глинозема в расплаве, реализующей принцип разомкнутого управления.

Алгоритмы косвенного оценивания неизмеряемых параметров находят самое широкое применение в автоматизированных системах управления процессом электролитического получения алюминия. Использование данной группы алгоритмов позволяет оперативно получать необходимую информацию о состоянии объекта управления, что, в свою очередь, способствует успешному решению следующих задач:

1) оценивание и управление электрическим сопротивлением электролита и величиной обратной ЭДС;

2) контроль параметров волнения поверхности раздела фаз металл - электролит и ликвидации этого волнения;

3) определения параметров анодного эффекта, возникающего на электролизере, его прогноза и своевременного гаше-

ния и др.

Разработанные алгоритмы успешно функционируют в составе АСУТП крупнейших предприятий по производству алюминия (Саянский и Таджикский алюминиевые заводы) [4] .

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Меликянц Р.В., Рабинович Б.В.* Автоматический контроль аюминиевых электролизеров/ ЦНИИцветмет экономики и информации. М., 1976.

2. Пути повышения эффективности производства и улучшения организации труда при автоматизации предприятий алюминиевой подотрасли: Обзор/М.Я.Фитерман, В.И.Берх, Р.Г.Локшин; ЦНИИцветмет экономики и информации. М., 1989.

3. *Фитерман М.Я., Берх В.И., Локшин Р.Г.* Концепции управления процессом электролитического производства алюминия//Цветные металлы. 1989. № 10.

4. *Ханукаева Д.М.* Анализ работы алгоритма питания электролизера глиноземом по оценке его концентрации в электролите//Проблемы производства алюминия, магния и электродных материалов: Сборник науч.трудов/ВАМИ. СПб. 1992.