

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берегев А., Горбач И.В. Microsoft SQL Server 2005 Analysis Services. OLAP и многомерный анализ данных. — СПб.: ВХБ — Петербург, 2007. — 928 с.
2. Ларсон Б. Разработка бизнес-аналитики в Microsoft SQL Server 2005. — СПб.: Питер, 2008. — 684 с.
3. Хоббс Л. Oracle 9iR2. Разработка и эксплуатация хранилищ баз данных / Пер. с англ. — М.: КУДИЦ — ОБРАЗ, 2004. — 592 с.
4. Богдан С.А., Ковин Е.А., Кудинов А.В., Марков Н.Г. Инструментальные средства разработки систем оперативного диспетчерского управления газотранспортными сетями // Известия Томского политехнического университета. — 2006. — Т. 309. — № 7. — С. 56–64.
5. Богдан С.А., Кудинов А.В. Принципы построения систем принятия решений для оперативного диспетчерского управления в MES газодобывающих компаний // Известия Томского политехнического университета. — Т. 313. — № 5. — С. 153–157.
6. Официальный сайт компании Microsoft [Электронный ресурс]. — режим доступа: <http://www.microsoft.com/sqlserver/2008/ru/ru/analysis-services.aspx>. — 15.09.2009.
7. Петренко Ф.А. Интуиция и анализ // Директор ИС. — 2006. — № 2. — [Электронный ресурс]. — режим доступа: <http://www.osp.ru/cio/2006/02/379887.htm>. — 15.09.2009.
8. Михайлов С. КИАС: слагаемые успеха при создании и внедрении // СЮ. — 2004. — № 4 [Электронный ресурс]. — режим доступа: <http://offline.cio-world.ru/2004/25/33214.htm>. — 15.09.2009.

Поступила 19.05.2009 г.

УДК 66.012

СИСТЕМА ЭКСТРЕМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОМ ПРОИЗВОДСТВА ТРИФЛАТОВ

А.Г. Бейгель*, А.Г. Горюнов, С.Н. Ливенцов, К.Б. Панов

Томский политехнический университет

*ОАО «Ангарский электролизный химический комбинат»

E-mail: alex79@phtd.tpu.ru

Рассмотрены вопросы управления технологическим процессом синтеза трифторметансульфофторида способом электрохимического фторирования метансульфофторида. В силу того, что зависимость удельной электропроводности электролита от концентрации метансульфофторида имеет нелинейный характер, и применение типовых линейных законов регулирования не допустимо, установлено, что для управления технологическим процессом синтеза трифторметансульфофторида необходимо использовать систему автоматического управления, построенную на базе экстремального регулятора удельной электропроводности электролита.

Ключевые слова:

Метансульфофторид, трифторметансульфофторид, электрохимическое фторирование, экстремальный регулятор, принцип запоминания максимума.

Key words:

Methane-sulphonyl chloride, trifluorometansulfonic fluoride, electrochemical fluorination, extreme controller, maximum storage principle.

Ряд объектов химической промышленности обладает экстремальной характеристикой по каналу «состав сырья» — «готовый продукт». Сложность объекта зачастую не допускает аналитического определения отношений между его входами и выходами, особенно с учетом больших масштабов вредных воздействий при возникновении аварий, высокой степенью реакционной способности, высокой токсичностью используемых компонентов, высокой стоимостью исходных компонентов и энергоносителей, используемых в производстве. Однако, применение алгоритмов управления экстремальных систем, в которых математическая модель управляемого объекта содержит нелинейную характеристику, а закон управления выбирается так, чтобы обеспечить достаточно малое отклонение выхода линейной части объекта от максимума нелинейной характеристики во время его работы, может оказаться эффективным для сложных процессов такого класса.

Системам экстремального регулирования, их структуре, алгоритмам поиска экстремума нелинейной характеристики, свойствам и реализации посвящено достаточно широкое число работ, например [1–3].

Объектом исследований в данной работе является разработка автоматизированной системы экстремального регулирования в составе технологического процесса синтеза трифторметансульфофторида способом электрохимического фторирования метансульфофторида (МС) [4].

Новизна предлагаемых подходов заключается в создании новых цифровых реализаций алгоритмов оптимального управления и оптимизации технологического процесса, учитывающих особенности статических и динамических характеристик электрохимического фторирования МС.

В ходе разработки системы управления решались следующие задачи: исследование технологи-

ческого процесса электрохимического фторирования МС как объекта управления, разработка математической модели процесса как объекта управления, отражающей физические и химические процессы, разработка компьютерной модели электролизера, проверка адекватности модели, разработка возможных вариантов алгоритмов управления, многокритериальный анализ и синтез систем автоматизированного управления электролизером.

Электрохимическое фторирование остается фактически единственным методом, используемым для промышленного производства трифторметансульфохлорида. Метод основан на электролизе метансульфохлорида $\text{CH}_3\text{SO}_2\text{Cl}$ в безводном фтористом водороде и относится к группе процессов, разработанных впервые Д. Саймонсом с сотрудниками в Пенсильванском университете в 1941 г. [5].

Технологическая схема установки электрохимического фторирования органических соединений остается практически неизменной со времен Д. Саймонса. Пример технологической схемы процесса можно найти в [5].

В результате проведенных исследований сотрудниками кафедры электроники и автоматики физических установок Томского политехнического университета [6] и Ангарского электролизного химического комбината установлено, что зависимость удельной электропроводности электролита от концентрации МС имеет нелинейный характер – параболический, и электролизеры синтеза ТФФ эксплуатируются в области максимума зависимости удельной электропроводности электролита (рис. 1).

Аппроксимация зависимости удельной электропроводности от концентрации МС и температуры электролита выполнена при помощи функции:

$$\chi(C_{\text{мс}}, T_{\text{эл}}) = aC_{\text{мс}}^2 + bC_{\text{мс}} + cT_{\text{эл}} - d, \quad (*)$$

где χ – удельная электропроводность электролита, См/см; a и b – коэффициенты; $a = -0,00038$, $b = 0,00766$; $C_{\text{мс}}$ – концентрация МС в электролите, мас. %; c – температурный коэффициент, $c = 0,003$; $T_{\text{эл}}$ – температура электролита, °С; d – смещение удельной электропроводности, $d = -0,00025$.

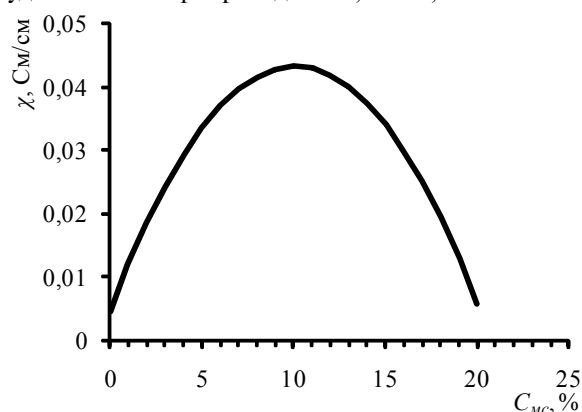


Рис. 1. Зависимость удельной электропроводности электролита от концентрации МС

Математическая модель процесса электрохимического фторирования, как объекта управления, представлена на рис. 2.

Исходя из закона Фарадея для электролитической ячейки, можно записать [7]:

$$m_{\text{мс}}(t) = \int [G_{\text{мс}}(t) - K_f I_{\text{ак}}(t)] dt,$$

где $m_{\text{мс}}$ – масса МС в электролите, кг; $G_{\text{мс}}(t)$ – массовый расход МС (подпитка МС), кг/с; K_f – постоянная, связывающая массовый расход газа с током нагрузки электролизера, кг/А·с; $I_{\text{ак}}(t)$ – ток нагрузки электролизера, А; t – время, с.

Концентрация МС в массовых долях определяется по формуле:

$$C_{\text{мс}} = \frac{m_{\text{мс}}}{m_{\text{эл}}} \cdot 100 = \frac{m_{\text{мс}}}{\rho_{\text{эл}} \cdot V_{\text{эл}}} \cdot 100, \quad \%,$$

где $m_{\text{эл}}$ – масса электролита, кг; $\rho_{\text{эл}}$ – плотность электролита, кг/м³; $V_{\text{эл}}$ – объем электролита, м³.

Для вычисления удельной электропроводности электролита χ воспользуемся выражением (*).

Проведенный анализ электролизера как объекта управления показал, что для управления необходимо использовать массовый расход $G_{\text{мс}}$, а в качестве регулируемой переменной – удельную электропроводность электролита. Управление электролизером с помощью тока нагрузки недопустимо, так как он задает необходимую производительность. Непосредственное управление концентрацией МС затруднено по причине отсутствия промышленно выпускаемых концентратомеров для данного электролита и пригодных для систем управления. Экспериментальные исследования технологического процесса синтеза трифторметансульфохлорида показали, что для оптимального режима синтеза необходимо стабилизировать заданную (необходимую) концентрацию МС в электролите изменяя массовый расход.

Явная нелинейная зависимость удельной электропроводности электролита от концентрации МС, а также требования работы электролизера в области экстремума электропроводности делают применение типовых линейных законов регулирования неприемлемым.

Проведенные исследования показали, что с целью оптимизации технологического процесса можно использовать экстремальный регулятор удельной электропроводности. Входной величиной экстремального регулятора в данном случае является приращение и запомненный экстремум удельной электропроводности, что существенно снижает требования к точности определения удельной электропроводности электролита. Данный подход позволил применить косвенный метод определения электропроводности по напряжению анод-катод электролизера.

Блок-схема алгоритма экстремального регулятора представлена на рис. 3. В этом алгоритме используются блок вычисления удельной электро-

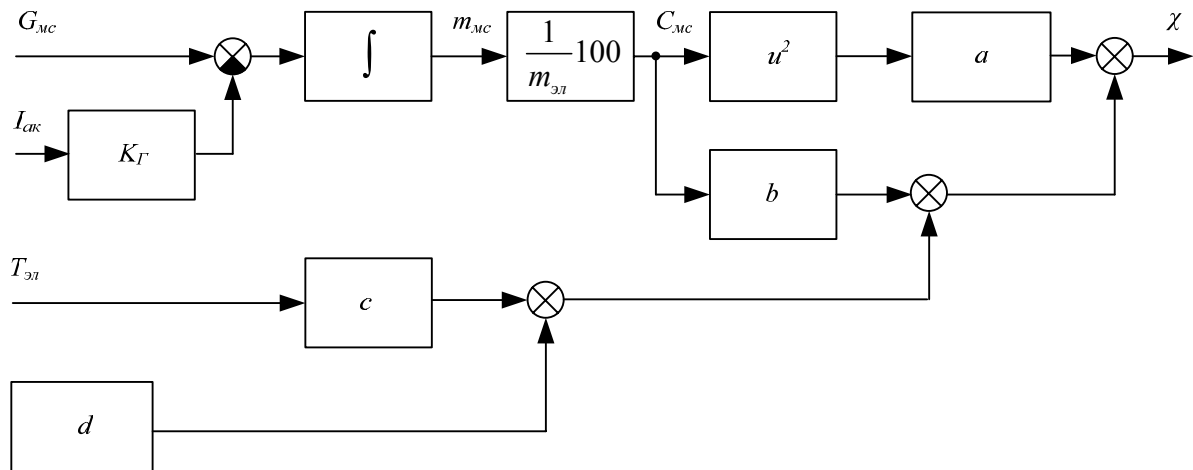


Рис. 2. Математическая модель процесса электрохимического фторирования как объекта управления

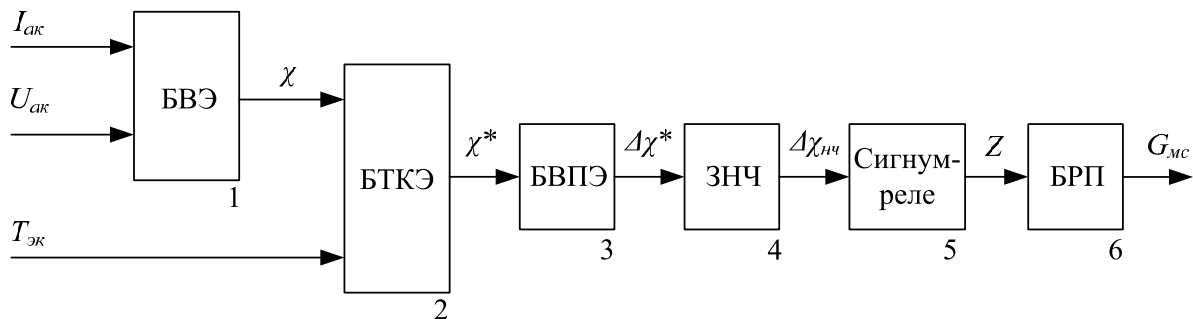


Рис. 3. Блок-схема алгоритма экстремального регулятора: 1) блок вычисления удельной электропроводности (БВЭ); 2) блок температурной компенсации удельной электропроводности (БТКЭ); 3) блок вычисления приращения удельной электропроводности (БВПЭ); 4) зона нечувствительности (ЗНЧ); 5) трехпозиционное сигнум-реле; 6) блок вычисления сигнала массового расхода метансульфохлаорида (БРП); $I_{ак}$ – ток нагрузки электролизера; $U_{ак}$ – напряжение анод-катод электролизера; χ – удельная электропроводность электролита; χ^* – компенсированная по температуре удельная электропроводность; $\Delta\chi^*$ – приращение χ^* за цикл работы регулятора; $\Delta\chi_{нч}$ – приращение χ^* превышающее зону нечувствительности; Z – сигнал с выхода трехпозиционного сигнум-реле; $G_{мс}$ – сигнал массового расхода метансульфохлаорида

проводности, блок температурной компенсации удельной электропроводности, блок вычисления приращения удельной электропроводности, зона нечувствительности, трехпозиционное сигнум-реле и блок расчета подпитки МС. В алгоритме экстремального регулятора использован принцип запоминания максимума.

Входные данными алгоритма – ток нагрузки электролизера $I_{ак}$, А, напряжение анод-катод электролизера $U_{ак}$, В, температура электролита $T_{эл}$, °С.

Выходные данными алгоритма – минимальный/максимальный и средний массовый расход МС $G_{мс}$, такт/мин.

Выходная величина объекта со статической характеристикой $\chi = f(C_{мс}, T_{эл})$ (рис. 1) подается на блок БВПЭ экстремального регулятора, в котором реализованы запоминающее устройств и элемент сравнения. Рассмотрим случай максимума. Запоминающее устройство такой системы должно фиксировать только увеличение входного сигнала χ , т. е. запоминание происходит только при увеличении χ . На уменьшение χ запоминающее устройство не реагирует. Сигнал с блока БВПЭ непрерыв-

но подается на элемент сравнения, где сравнивается с текущим значением сигнала χ . Сигнал разности $\Delta\chi^*$ с элемента сравнения блока БВПЭ поступает на блок трехпозиционного сигнум-реле. Когда разность $\Delta\chi^*$ достигает значения зоны нечувствительности $\Delta\chi_{нч}$ сигнум-реле, оно производит реверс исполнительного механизма, реализованного в блоке БРП, который воздействует на входной сигнал $G_{мс}$ объекта. После срабатывания сигнум-реле запомненное блоком БВПЭ значение χ сбрасывается, и запоминание сигнала χ начинается снова.

Испытание системы управления выполнялось на компьютерной модели, выполненной в программном пакете «Matlab». На рис. 4 представлен переходный процесс по возмущению по токовой нагрузке. Видно, что система экстремального управления выводит электролизер на максимальную удельную электропроводность и обеспечивает приемлемое качество управления (ошибка регулирования – менее 1 %, время регулирования – менее 1 ч).

На рис. 5 представлен переходный процесс по возмущению по температуре электролита. Видно, что система экстремального управления обеспечи-

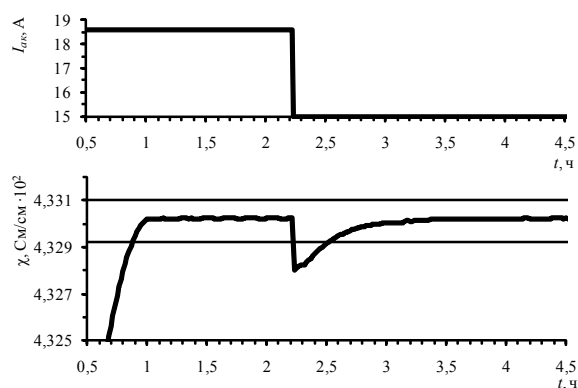


Рис. 4. Переходный процесс удельной электропроводности по возмущению по токовой нагрузке электролизера

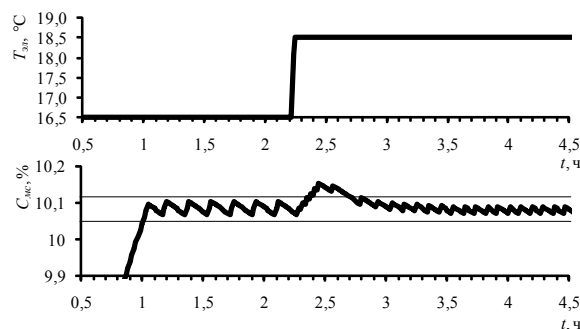


Рис. 5. Переходный процесс концентрации МС по возмущению по температуре электролита

вает приемлемое качество управления (ошибка регулирования — менее 1 %, время регулирования — менее 1 ч).

Разработанный алгоритм экстремального управления успешно испытан и внедрен на ОАО «Ангарский электролизный химический комбинат».

Выводы

Для управления технологическим процессом синтеза трифторметансульфотрида способом электрохимического фторирования метансульфотрида предложена система автоматического управ-

ления, построенная на базе экстремального регулятора удельной электропроводности электролита. Это позволяет вывести технологический процесс на оптимальную рабочую точку, обеспечивающую минимальные затраты на электроэнергию и максимальный выход по трифторметансульфотриду.

Работа поддержана грантом Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы по направлению «Физическая химия. Электрохимия. Физические методы исследования химических соединений» в рамках мероприятия 1.2.2. Программы по теме «Компьютерное моделирование, автоматизированное управление и оптимизация электрохимических производств».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Красовский А.А. Универсальные алгоритмы оптимального управления непрерывными процессами. — М.: Наука, 1977. — 270 с.
2. Александров А.Г. Оптимальные и адаптивные системы. — М.: Высшая школа, 1989. — 262 с.
3. Красовский А.А. Справочник по теории автоматического управления. — М.: Наука, 1987. — 712 с.
4. ОАО «Ангарский электролизный химический комбинат» [Электронный ресурс]. — режим доступа: <http://www.aecc.ru/>, свободный. — Загл. с экрана. — 25.08.2009.
5. Прикладная электрохимия / под ред. д.т.н. проф. А.П. Томилова. — 3-е изд., перераб. — М.: Химия, 1984. — 520 с.
6. Бейгель А.Г., Горюнов А.Г., Ливенцов С.Н. Математическая модель электрохимического синтеза трифторметансульфотрида // Технология и автоматизация атомной энергетики: Матер. отраслевой научно-техн. конф. — 22–26 мая 2006 г. — Северск: Изд-во СГТА, 2006. — С. 33.
7. Грилихес М.С., Филановский Б.К. Контактная кондуктометрия: теория и практика метода. — Л.: Химия, 1980. — 176 с.

Поступила 10.09.2009 г.