

УДК 681.5  
ББК 32.965, 31.391

## **СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ КАСКАДОМ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ЭКСТРАКТОРОВ**

**Горюнов А. Г.<sup>1</sup>**

*(Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет, Томск)*

*Предложена система автоматического управления концентрациями урана в экстрактах, рафинате и реэкстрактах каскада центробежных экстракторов с применением аппарата теории нечетких множеств и нечеткой логики, нечетких нейронных сетей. Система обеспечивает малую чувствительность к нестабильности параметров объекта управления, снижение содержания молибдена в произведенном продукте не менее чем в 2 раза и повышение производительности на 2–3%.*

Ключевые слова: аффинаж урана, центробежный экстрактор, гибридная система управления, нечеткая нейронная сеть.

### **1. Введение**

Урановый химический концентрат является промежуточным сырьем производства тетрафторида урана и закиси-оксида урана, которые, в свою очередь, являются сырьем для производства гексафторида урана в ядерном топливном цикле. При этом урановые химические концентраты даже при применении селективных методов извлечения [29] содержат 60–80% урана и 5–20% примесей. Применение таких продуктов в качестве ядерного топлива недопустимо, так как они содержат В, Cd, Li и редкоземельные элементы (лантаноиды) Hf, Gd, являющиеся «погло-

---

<sup>1</sup> Алексей Германович Горюнов, кандидат технических наук, доцент, докторант, доцент кафедры электроники и автоматики физических установок (alex1479@mail.ru).

тителями» нейтронов и снижающие эффективность работы реактора. Кроме них, уран необходимо тщательно очищать от элементов, которые снижают пластичность и повышают коэффициент термического расширения ядерного топлива (редкоземельные элементы, W, Mo, Si, P), что может привести к разрушению тепловыделяющих сборок и повышению радиационного фона на атомной электростанции. Все это требует более тонкой химической очистки для достижения ядерной чистоты – аффинажа концентратов природного урана [29]. Аффинаж с применением экстракции в настоящее время – наиболее употребительный и эффективный метод. Как правило, трибутилфосфат (ТБФ) широко используют для аффинажа урана во всех странах мира, где существует атомная технология. Технологическая схема экстракционного аффинажа урана на предприятиях отрасли включает: растворение урановых концентратов в азотной кислоте, экстракцию нитрата уранила раствором ТБФ в органическом разбавителе в присутствии высаливателя с последующей реэкстракцией урана и выводом рафината [14].

На радиохимическом заводе ОАО «Сибирский химический комбинат» (РХЗ СХК) ведутся монтажные работы по подготовке к пуску экстракционного каскада аффинажа концентратов урана с применением центробежных экстракторов. Обоснование применения центробежных экстракторов приведены в работе [21]. На данный момент проектные системы автоматического управления (САУ) выполнены по аналогу каскадов экстракционных колонн, существующих на РХЗ СХК. Однако особенности новой технологии (другая конфигурация экстракторов, наличие протяженных трубопроводов, измененное расположение датчиков КИП, применение пневматического привода на регулирующей арматуре вместо электроприводов постоянной скорости и другие факторы) могут привести к тому, что в процессе пуска-наладки и отработки технологии потребуются коррекция проектных решений для обеспечения нормального функционирования САУ новым технологическим процессом.

В проектной АСУ ТП не предусмотрено автоматического управления концентрациями урана в экстрактах, рафинатах и

реэкстрактах. Управление этими переменными предлагается вести в автоматизированном режиме оператором, т.е. посредством ручного дистанционного управления. Как правило, это приводит к плохому качеству управления процессом и повышению отрицательного влияния человеческого фактора и, следовательно – к снижению эффективности.

Поэтому актуально провести исследования с целью оптимизации контроля и управления каскадом экстракционного аффинажа концентратов природного урана на центробежных экстракторах и использовать современный опыт в области математического моделирования и разработки систем управления технологическими процессами и производствами.

Несмотря на большую значимость, вопросы, связанные с разработкой, изучением основных эксплуатационных характеристик, включая моделирование динамических неравновесных процессов экстракции/реэкстракции в центробежных экстракторах, и промышленным внедрением центробежных экстракторов, слабо освещены в научно-технической литературе [23]. Это значительно затрудняет решение проблемы повышения эффективности переработки ядерного топлива на существующих и вновь вводимых в эксплуатацию производствах.

## **2. Постановка задачи**

Основная цель работы – разработка эффективной системы автоматического управления концентрациями урана в экстрактах, рафинате и реэкстрактах каскада центробежных экстракторов.

Цель управления – обеспечение стабилизации концентраций урана в экстракте, рафинате и реэкстракте на заданном уровне со среднеквадратичным отклонением не более 1–3%.

При построении основных контуров управления концентрациями урана в экстрактах, рафинате и реэкстрактах на исследуемой установке РХЗ СХК необходимо учитывать следующие ограничения:

1) управление в режиме жесткого реального времени следует реализовывать с горячим резервированием управляющих контроллеров;

2) применяемые управляющие контроллеры имеют ограниченные вычислительные возможности [26], не позволяющие расширять функции математического обеспечения;

3) для управления следует использовать только типовые П-, ПИ-, ПИД-регуляторы.

Для решения подобных задач при выполнении структурного и параметрического синтеза САУ автором успешно используется на практике подход синтеза и анализа алгоритмов и систем автоматического управления технологическими процессами с применением математического моделирования САУ [10, 11, 12, 13, 33] и многокритериального анализа [16], включающий следующие этапы:

1. Разработка моделей объекта, необходимых для структурного и параметрического синтеза вариантов САУ: исследование чувствительности линейности модели, линеаризации для частных условий или выделения нелинейной части; определение динамических зависимостей между основными технологическими переменными в допустимом диапазоне с помощью вычислительных экспериментов на компьютерной модели; линеаризацию динамической модели путем аппроксимации переходных функций, полученных на компьютерной модели, решениями соответствующих линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами.

2. Структурный синтез возможных вариантов и разработка компьютерных моделей САУ.

3. Исследования на компьютерной модели качественных показателей САУ, включая разработку критериев качества управления; расчет параметров настройки регуляторов; выбор оптимальной САУ по результатам исследований разработанных САУ на устойчивость, грубость, качество управления.

4. Компьютерные испытания разработанной САУ с использованием аналитической модели технологического процесса, учитывающей физико-химические процессы.

### **3. Математическое моделирование экстракционного каскада как объекта управления**

Для исследования систем автоматического управления технологическим процессом автором использована математическая модель каскада центробежных экстракторов, позволяющая рассчитывать концентрации распределяющихся макро- и микрокомпонентов по ступеням каскада в динамике в зависимости от входных переменных [7]. В основу положена ячеечная модель многокомпонентного неравновесного экстракционного процесса в колонне, приведенная в работах [9, 33]. Для расчета профилей распределения концентраций колонна разбивается на  $n$  сечений – ячеек, в которых присутствуют две несмешиваемые фазы (дисперсная и сплошная), при расчете концентраций  $k$  компонентов внутри фаз каждой ячейки и используется модель идеального перемешивания. Скорость перехода компонентом границы раздела фаз в этом случае принимается больше скорости доставки – отвода. При этом равновесное состояние на границе раздела фаз в каком-либо  $i$ -м сечении колонны для  $j$ -й компоненты при массопереносе будет описываться уравнением равновесия. Для моделирования динамики экстракционного процесса в колонне решается система дифференциальных уравнений для каждой ячейки, состоящая из дифференциальных уравнений материального баланса для дисперсной и сплошной фазы с учетом диффузии. При моделировании каскада центробежных экстракторов за ячейку принята смесительная камера центробежного экстрактора. Камера разделение моделируется как динамическое звено запаздывания с учетом допущения о полном разделении фаз без взаимного уноса. Расчет межфазных поверхностей в смесительных камерах и поверхностей раздела фаз в камерах разделения осуществляется по выражениям из работы [23]. Математическая модель реализована в виде компьютерной модели в программном комплексе *Matlab*, представляет собой законченный блок для пакета расширения *Simulink*. Адекватность модели проверена с использованием экспериментальных данных с РХЗ СХК. Среднеквадратичные отклонения расчетных

значений основных технологических переменных от экспериментальных данных, как показатель адекватности, не превышает 10%, чего вполне достаточно для инженерных расчетов.

Информационная структурная схема математической модели объекта управления представлена на рис. 1. Перерабатываемый продукт, водная фаза (ВФ) – азотнокислый раствор концентратов природного урана, содержащий примеси, поступает в монжюс (М), где доводится до требуемых регламентом значений концентраций урана и азотной кислоты. Далее под действием сжатого воздуха перекачивается в емкость-сборник перерабатываемого продукта (Е1). Подготовленный раствор – первая водная фаза (ВФ1) с помощью электрических насосов передается в экстракционный блок (ЭБ) центробежных экстракторов. Кроме того, в ЭБ с помощью электрических насосов закачивается органическая фаза (ОФ) – экстрагент (раствор ТБФ в керосине) из емкости-сборника ОФ. Расходы ВФ1 ( $Q_{ВФ1}$ ) и ОФ ( $Q_{ОФ}$ ) стабилизируются локальными системами автоматического управления (САУ). В экстракционном блоке происходит взаимодействие экстрагента с исходным раствором, вследствие чего уран из исходного раствора переходит в экстрагент. Существенная часть примесей остается в водном потоке – рафинате (РФ), отвальном продукте. Первый экстракт урана (Э1) из ЭБ самотеком поступает в промывной блок (ПБ). В этот же блок поступает третья водная фаза (ВФ3) – азотнокислый раствор урана, ранее очищенный от примесей. Расход ВФ3 ( $Q_{ВФ3}$ ) стабилизируется локальной САУ. В промывном блоке происходит дополнительное насыщение экстракта ураном с целью максимального вытеснения из него примесей. Рафинат промывного блока – четвертая водная фаза (ВФ4) – самотеком поступает в емкость-сборник (Е2) и далее – в монжюс. Второй экстракт (Э2) из промывного блока поступает в буферную емкость-сборник экстракта (Е3). Из нее экстракт Э2 (Э2/1 и Э2/2) перекачивается электрическими насосами в два реэкстракционных блока (РБ1/2), работающих параллельно. Одновременно с экстрактами Э2/1 и Э2/2 в РБ1 и РБ2 поступает пятая водная фаза (ВФ5/1 и ВФ5/2). В РБ1 и РБ2 происходит процесс реэкстракции урана. Реэкс-

тракты урана (PP1 и PP2) поступают в емкости-сборники целевого продукта – очищенные до ядерной чистоты от примесей азотнокислые растворы концентратов природного урана.

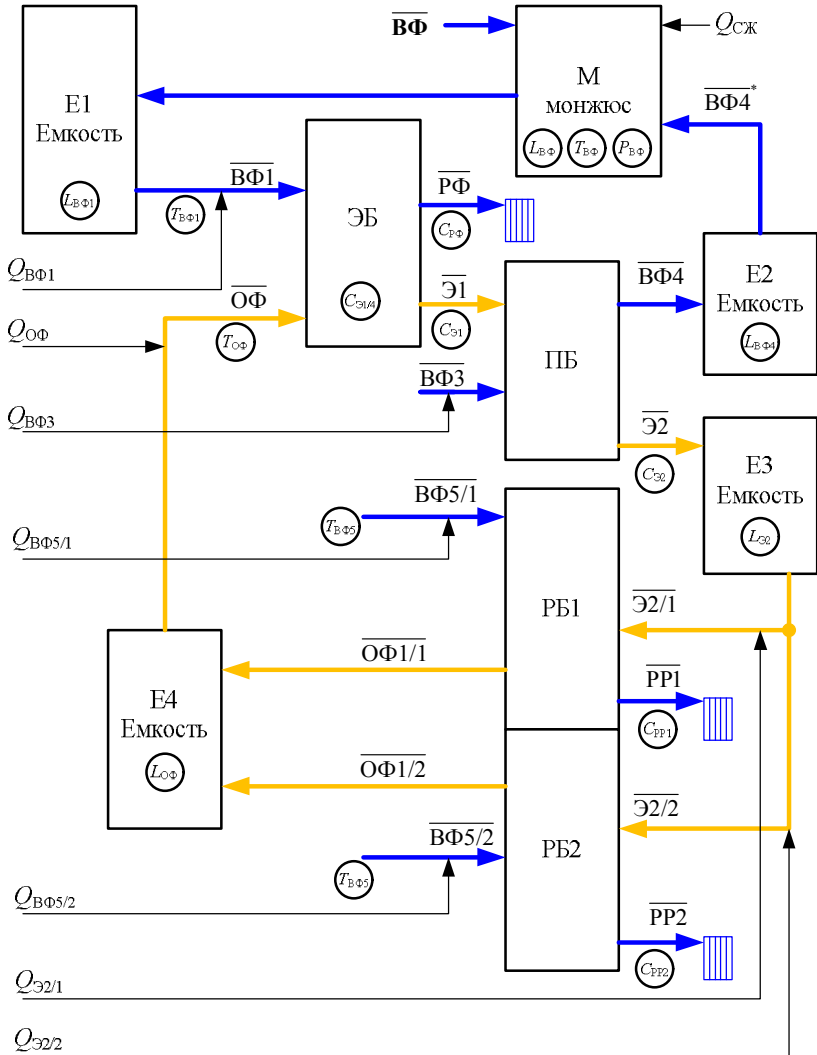


Рис. 1. Информационная структурная схема математической модели объекта управления

Оборотные экстрагенты (ОФ1/1 и ОФ1/2) самотеком поступают в емкость-сборник ОФ (Е4). Расходы ВФ5/1 ( $Q_{ВФ5/1}$ ), ВФ5/2 ( $Q_{ВФ5/2}$ ), Э2/1 ( $Q_{Э2/1}$ ) и Э2/2 ( $Q_{Э2/2}$ ) стабилизируются локальными САУ.

Проектная АСУ ТП производит контроль, сигнализацию, блокировки и автоматику. В том числе в монжюсе ведется контроль, сигнализация и автоматика по уровню жидкости ( $L_{ВФ}$ ), температуре ( $T_{ВФ}$ ) и давлению ( $P_{ВФ}$ ); в емкости Е1 – по уровню жидкости ( $L_{ВФ1}$ ); в экстракционном блоке – по концентрации урана в экстракте на выходе ( $C_{Э1}$ ), в середине ЭБ ( $C_{Э1/4}$ ) и в рафинате ( $C_{РФ}$ ), по температурам в ВФ1 ( $T_{ВФ1}$ ) и ОФ ( $T_{ОФ}$ ); в промывном блоке – по концентрации урана в экстракта Э2 ( $C_{Э2}$ ); в емкостях Е2, Е3 – по уровням жидкости ( $L_{ВФ4}$ ,  $L_{Э2}$ ); в реэкстракционных блоках – по концентрации урана в реэкстрактах ( $C_{РР1}$  и  $C_{РР2}$ ) и по температуре ВФ5 ( $T_{ВФ5}$ ); в емкости Е4 – по уровню жидкости ( $L_{ОФ}$ ). Таким образом, проектная АСУ ТП не предусматривает автоматического управления концентрациями урана в экстрактах и реэкстрактах.

На основании работ [19, 21, 28] в математической модели учитываются в качестве макрокомпонентов – уран (VI), азотная кислота, а в качестве микрокомпонента – молибден, как примесь, вызывающая наибольшие трудности в аффинаже природного урана.

На рис. 1 вещественно-информационные потоки описаны в виде векторов, например для ВФ1:

$$(1) \overline{ВФ1} = \{Q_{ВФ1}, T_{ВФ1}, C_u^{ВФ1}, C_a^{ВФ1}, C_{mo}^{ВФ1}\},$$

где  $C_u^{ВФ1}$ ,  $C_a^{ВФ1}$ ,  $C_{mo}^{ВФ1}$  – концентрации в потоке ВФ1 урана, азотной кислоты и молибдена соответственно.

Основными управляющими воздействиями на объект управления являются:

- расходы  $Q_{ВФ1}$ ,  $Q_{ВФ5/1}$ ,  $Q_{ВФ5/2}$ ;
- расходы  $Q_{Э2/1}$ ,  $Q_{Э2/2}$ ,  $Q_{ОФ}$ , задающие производительность каскада.

Основными управляемыми переменными объекта являются:



- концентрации урана в экстракционном блоке  $C_{Э1/4}$ , в экстрактах  $C_{Э1}$ ,  $C_{Э2}$ , рафинате  $C_{РФ}$  и реэкстракте  $C_{РР1}$ ,  $C_{РР2}$ ;
- уровни жидкостей в промежуточных емкостях Е3 и Е4 ( $L_{Э2}$  и  $L_{ОФ}$ ).

Основные возмущающие воздействия на объект управления:

- концентрация урана  $C_{ВФ}$ , азотной кислоты и примесей в ВФ, оказывающие существенное влияние на параметры ВФ1;
- температура  $T_{ВФ1}$  на входе в экстракционный блок;
- температура  $T_{ОФ}$  на входе в экстракционный блок;
- температура  $T_{ВФ3}$  на входе в реэкстракционные блоки. Следует отметить, что в проекте АСУ ТП приведенные температуры контролируются, но не стабилизируются.

Подготовка исходной смеси перерабатываемого продукта без флуктуаций концентраций металла, азотной кислоты и примесей затруднительна, что приводит к флуктуации основных управляемых переменных – концентрации урана в экстракте, реэкстракте и рафинате.

Математическим моделированием установлены статические зависимости расходов ОФ и ВФ1 от концентрации урана в перерабатываемом продукте (см. рис. 2) при обеспечении заданных концентраций урана в экстракте Э1 и рафинате РФ.

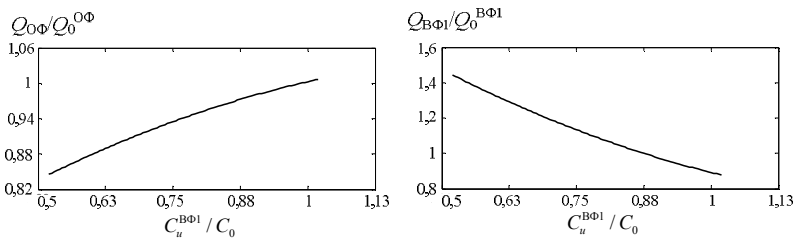


Рис. 2. Статические зависимости расходов ОФ и ВФ1 от рабочей точки по концентрации урана в ВФ1:

$C_0$  – номинальное значение концентрации урана в ВФ1;

$Q_0^{ВФ1}$  – номинальный расход ВФ1;

$Q_0^{ОФ}$  – номинальный расход ОФ

Вычислительные эксперименты по исследованию переходных функций на разработанной компьютерной модели каскада центробежных экстракторов позволили получить соответствующие линейные динамические модели путем аппроксимации их переходных функций решениями соответствующих линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами.

На рис. 3 представлены статические зависимости параметров модели (2), описывающей переходные процессы с погрешностью менее 10%, для канала управления « $Q_{ВФ1} \rightarrow C_{Э1}$ » в зависимости от рабочей точки при обеспечении заданных концентраций урана в экстракте Э1 и рафинате РФ.

$$(2) \quad W_{Э1}^{ВФ1}(s) = \frac{K \cdot e^{-\tau s}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)(T_3 s + 1)},$$

где  $K$  – коэффициент передачи ЭБ по каналу « $Q_{ВФ1} \rightarrow C_{Э1}$ »;  $T_1, T_2, T_3$  – постоянные времени, с;  $\tau$  – время запаздывания, с.

Математическое моделирование позволило установить, что наибольшее влияние на изменение параметров модели (2) оказывает концентрация урана в ВФ1, в меньшей степени – емкость ОФ по урану, концентрация азотной кислоты (при изменении в регламентных пределах).

Остальные каналы управления, такие как « $Q_{ВФ3} \rightarrow C_{Э2}$ », « $Q_{ВФ5/1} \rightarrow C_{РР1}$ », « $Q_{ВФ5/2} \rightarrow C_{РР2}$ », также описаны линейными моделями вида (2), которые воспроизводят переходные процессы в диапазоне  $\pm 20\%$  от регламентных значений переменных с погрешностью менее 10% при обеспечении заданных концентраций урана в экстракте Э1 и были использованы для синтеза алгоритмов управления процессами в каскадах центробежных экстракторов.

Таким образом, экстракционный блок является нестационарным объектом управления при больших возмущающих воздействиях, следовательно, при разработке САУ экстракционным каскадом актуально рассмотреть возможность реализации адаптивной системы. При этом для контуров адаптации возможно использовать усредненное значение расхода ВФ1. С

другой стороны, при обеспечении заданных концентраций урана в экстракте Э1 промывной и рекстракционные блоки возможно отнести к стационарным линейным объектам, для управления которыми достаточно типовых регуляторов.

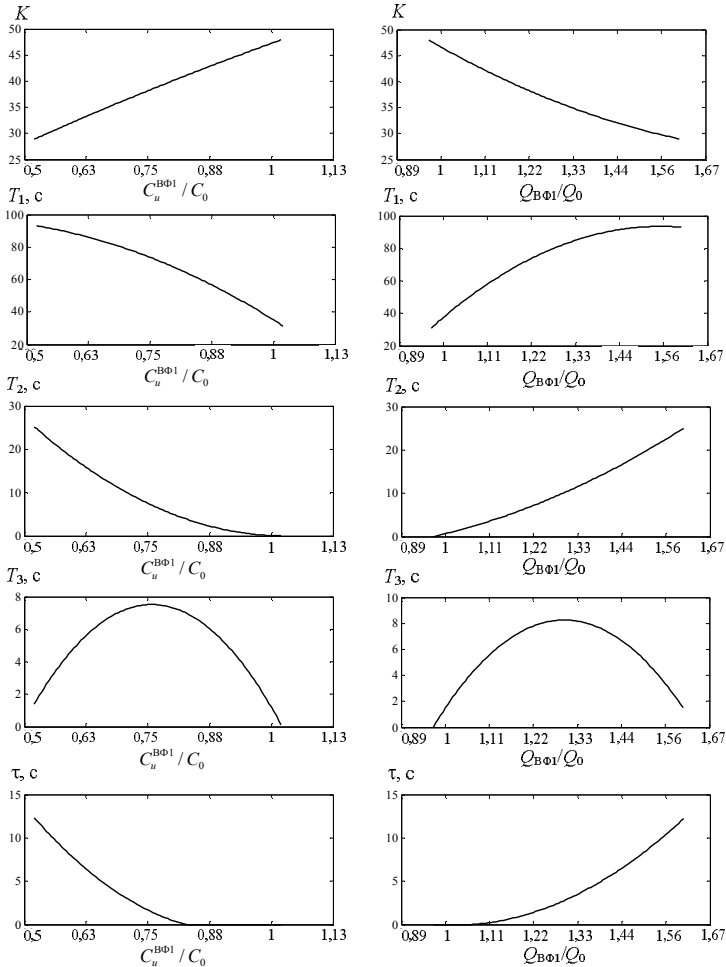


Рис. 3. Статические зависимости параметров линейной модели (2) от рабочей точки по концентрации урана в ВФ1:  $C_0$  – стационарное значение концентрации урана в ВФ1;  $Q_0$  – стационарный расход ВФ1

#### **4. Система автоматического управления концентрациями урана в экстракционном каскаде**

В открытых источниках найдена лишь одна публикация, содержащая пример и рекомендации по построению САУ каскадом центробежных экстракторов [23] переработки ядерного топлива. В работе подтверждается необходимость автоматического управления не только расходами, но и концентрациями урана в водных и органических потоках. Предложен метод «регулирования с использованием внутренних параметров». В данном случае под внутренним параметром понимается концентрация урана в органической или водной фазах внутри экстракционного блока. Например, как в схеме на рис. 1 концентрация урана в экстракте 4 ступени экстракционного блока  $C_{Э1/4}$ . В работе сделан вывод, что «из-за сопоставимости времени пребывания растворов в центробежных экстракторах с временем измерения концентраций и корректировки потоков невозможно управлять технологическим процессом только по конечным параметрам». Данное утверждение вызывает сомнение и требует дополнительных исследований. Тем более что внутренняя переменная экстракционного/реэкстракционного блока имеет транспортное запаздывание, большее на порядок, чем выходная переменная, что усложняет построение САУ. Кроме того, смещение внутренней переменной в сторону рафината в экстракционном блоке и в сторону оборотного экстрагента в реэкстракционном блоке вследствие уменьшения величины концентрации приведет к увеличению времени измерения концентрации урана. Так, на исследуемом каскаде использование концентрации урана в экстракте 4-й ступени  $C_{Э1/4}$  вместо  $C_{Э1}$  при ее измерении методом рентгеновской спектроскопии приведет к увеличению времени измерения с 10 с до 20 с, а для  $C_{рф}$  – до 30 с. В этой связи актуально провести структурный и параметрический синтез САУ каскадом центробежных экстракторов.

Исследуемые объекты управления (экстракционный, промывной, реэкстракционный блоки, демпферные емкости) имеют достаточные линейные участки статических характеристик по

каналам «управляющее воздействие – управляемая переменная» для эффективного управления ими, а инерционность каналов с достаточной точностью описывается динамическими звеньями второго порядка с запаздыванием. Это позволяет применять типовые линейные законы регулирования с обеспечением приемлемого качества управления.

Исследование динамических зависимостей концентраций урана в экстрактах, рафинатах и реэкстрактах от расходов водной фазы по каскаду центробежных экстракторов показывают, что инерционность таких объектов управления, как монжюс М, емкости Е1, Е2, Е3 и Е4 (см. рис. 1) в соответствии с их геометрией, значительно превышает инерционность экстракционного, промывного и реэкстракционного блоков. Это позволяет автономно проводить синтез САУ экстракционным, промывным и реэкстракционными блоками.

С использованием линейных математических моделей вида (2) по основным управляющим воздействиям автором был выполнен структурный и параметрический синтез возможных вариантов САУ концентрациями урана в экстракционном, промывном и реэкстракционных блоках в рабочей точке соответствующей  $C_0$  (см. рис. 2 и 3).

Для экстракционного блока рассматривались варианты:

– одноконтурные САУ с управляющим воздействием по ВФ1: САУ концентрацией урана в экстракте Э1; концентрацией урана в 4 ступени экстракционного блока; концентрацией урана в рафинате;

– двухконтурные САУ с одним управляющим воздействием по ВФ1: САУ концентрацией урана в экстракте Э1 и рафинате; концентрацией урана в экстракте Э1 и с зоной нечувствительности в рафинате; концентрацией урана в экстракте Э1 и с зоной нечувствительности в 4 ступени.

В качестве САУ концентрацией урана в экстракте Э2 была рассмотрена система с управлением по расходу ВФ3.

Для реэкстракционных блоков были исследованы варианты: САУ концентрацией урана в реэкстракте РР1 (РР2); САУ концентрацией урана в оборотном экстрагенте ОФ1/1 (ОФ1/2).

При исследовании возможных вариантов САУ двухканальные системы управления по ВФ и ОФ показали низкое качество управления и недостаточную грубость. Это обусловлено существенными перекрестными связями по ВФ и ОФ, что значительно усложняет разработку эффективных компенсаторов перекрестных связей.

Исследование возможных вариантов САУ выполнялось с применением компьютерной модели каскада центробежных экстракторов (см. рис. 1) [6, 7, 8, 15] с применением подхода многокритериального анализа [16]. Исследовались переходные процессы в САУ при ступенчатых возмущениях по концентрации урана и азотной кислоты по температуре ВФ1, ВФ3, а также по температуре ВФ5. Анализировались прямые показатели качества такие, как время регулирования и динамический коэффициент регулирования. Также исследовалась грубость систем при смещении рабочей точки  $\pm 10\%$  по концентрации урана в ВФ1. Кроме того, исследовались переходные процессы в САУ при непрерывных возмущениях по концентрации урана и азотной кислоты по температуре ВФ1, ВФ3, а также по температуре ВФ5, которые были аппроксимированы рядом гармоник с использованием реальных данных с РХЗ СХК. Например, для концентрации урана в ВФ1:

$$(3) \quad \Delta C_u^{ВФ1}(t) = 50 \sin(0,003t + \pi) + \frac{50}{2} \sin(0,009 + \pi) + \frac{50}{3} \sin(0,03t + \pi), \text{ г/л.}$$

При этом использовались показатели качества, такие как ошибка регулирования и среднеквадратичного отклонения регулируемой величины от ее среднего значения. Кроме того, анализировалось изменение производительности каскада по урану и изменение концентрации молибдена в продуктах. Исходя из минимизации перечисленных критериев, выбрана САУ концентрациями урана в экстракционном, промывном и реэкстракционных блоках, приведенная на рис. 4.

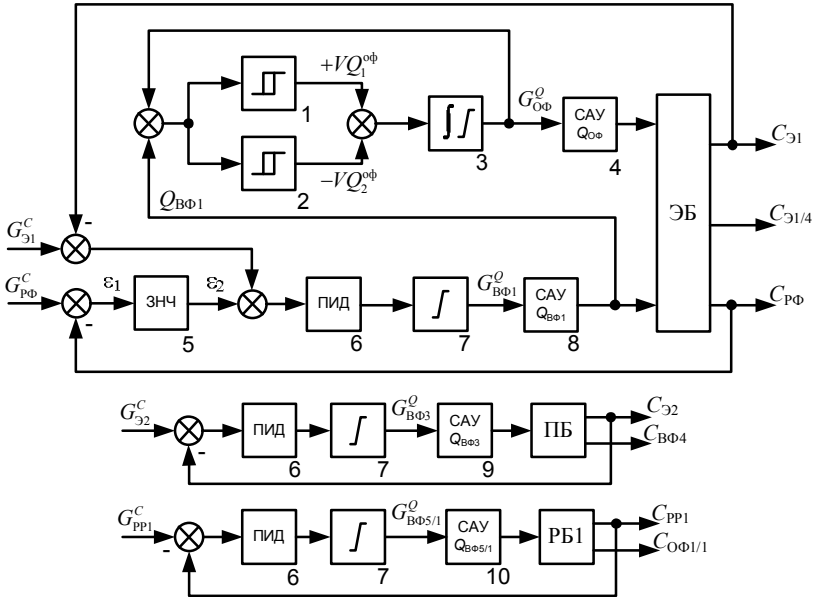


Рис. 4. САУ концентрациями урана в экстрактах, рафинате и реэкстрактах: 1,2 – реле; 3 – интегратор; 4 – САУ расходом ОФ; 5 – зона нечувствительности; 6 – ПИД-регулятор; 7 – блок управляемого ограничения выхода регулятора; 8, 9, 10 – САУ расходами ВФ1, ВФ3, ВФ5/1;  $G$  – заданное значение

Особенность данной системы – зона нечувствительности (ЗНЧ), которая обеспечивает нечувствительность САУ к положительным отклонениям концентрации урана  $C_{Э1/4}$ , что допускает снижение концентрации урана в рафинате и ограничивает ее рост относительно заданного значения:

$$(4) \quad \begin{cases} \varepsilon_2 = 0, & \text{при } \varepsilon_1 \geq 0, \\ \varepsilon_2 = \varepsilon_1, & \text{при } \varepsilon_1 < 0. \end{cases}$$

Исходя из максимальной производительности центробежных экстракторов и технологических требований к системе (рис. 4), рассчитываются ограничения для расходов ВФ1, ВФ3, ВФ5/1, ВФ5/2:

$$Q_{ВФ1}^{\max} = Q_{ВФ3}^{\max} = Q_{\max} - Q_{ОФ},$$

$$(5) \quad Q_{ВФ5/1,2}^{\max} = 1,2Q_{Э2/1,2} < Q_{\max} - Q_{Э2/1,2},$$

$$Q_{ВФ5/1,2}^{\min} = Q_{Э2/1,2}.$$

где  $Q_{ВФ1}^{\max}$ ,  $Q_{ВФ3}^{\max}$ ,  $Q_{ВФ5/1,2}^{\max}$  – рассчитанное максимальное значение расходов ВФ1, ВФ3, ВФ5/1, ВФ5/2;  $Q_{\max}$  – максимальная производительность центробежных экстракторов;  $Q_{ВФ5/1,2}^{\min}$  – рассчитанный минимальный расход ВФ5/1 и ВФ5/2.

На основании технологических требований для достижения максимальной эффективности работы экстракционного каскада необходимо обеспечить максимальную производительность экстракторов, максимальное насыщение экстракта ураном (с целью вытеснения примесей), содержание урана в рафинате и оборотном экстрагенте ниже допустимых значений:

$$(6) \quad Q \rightarrow Q_{\max}, C_u^{Э2} \rightarrow C_{\max}^{ОФ}, C_u^{ОФ1} < C_{\text{доп}}^{ОФ1}, C_u^{РФ} < C_{\text{доп}}^{РФ},$$

где  $Q$  – суммарный расход ВФ и ОФ;  $C_u^{Э2}$  – концентрация урана в экстракте Э2;  $C_u^{ОФ1}$  – концентрация урана в оборотном экстрагенте ОФ1;  $C_u^{РФ}$  – концентрация урана в рафинате РФ;  $C_{\max}^{ОФ}$  – концентрация, соответствующая максимальной емкости ОФ по урану;  $C_{\text{доп}}^{ОФ1}$ ,  $C_{\text{доп}}^{РФ}$  – концентрации, соответствующие предельно допустимым содержаниям урана в оборотном экстрагенте и рафинате.

Реализация  $Q \rightarrow Q_{\max}$  в (4) приведет к  $Q_{ВФ1} = Q_{ВФ1}^{\max}$ , однако в этом случае САУ концентрацией урана в Э1 и Э2 окажутся в насыщении и будут работать неэффективно. В этой связи автором предложено скорректировать условие эффективности (6) следующим образом:

$$(7) \quad Q \rightarrow Q_{\max} - \Delta Q_{ВФ1}, C_u^{Э2} \rightarrow G_{Э2}^C,$$

$$C_u^{ОФ1} < C_{\text{доп}}^{ОФ1}, C_u^{РФ} < C_{\text{доп}}^{РФ},$$

где  $G_{Э2}^C$  – заданное значение концентрации урана в экстракте Э2 (приближенное к максимальной концентрации урана в соответствии с текущей максимальной емкостью ОФ по урану), обеспечивающее содержание примесей ниже предельных значе-



ний;  $\Delta Q_{ВФ1}$  – запас «хода» для САУ концентрацией урана в экстракте Э1.

На рис. 5 представлена статическая характеристика трехпозиционного реле, построенного на основе двухпозиционных реле 1 и 2 (см. рис. 4), обеспечивающего выполнение условия (7).

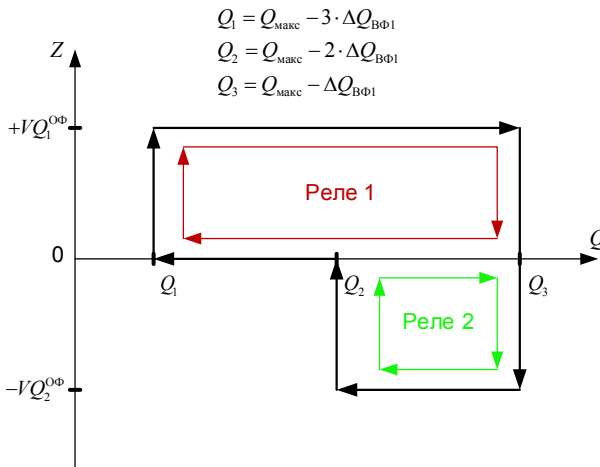


Рис. 5. Статическая характеристика трехпозиционного реле алгоритма расчета расхода ОФ

На основе результатов исследований статических зависимостей концентрации урана в экстракте Э1 от расхода ВФ1 и влияния на нее основных возмущений на уровне  $\pm 10\%$  сделан вывод о достаточности запаса «хода»  $\Delta Q_{ВФ1}$  на уровне  $\pm 10\%$  от стационарного расхода ВФ1.

Математическим моделированием установлено, что скорости изменения расхода  $VQ_1^{OF}$ ,  $VQ_2^{OF}$  необходимо выбирать таким образом, чтобы инерционность контура расхода ОФ была в 2–4 раза больше инерционности контура управления по ВФ1. В противном случае САУ может потерять устойчивость либо обеспечивать низкое качество управления.

Разработанная САУ концентрациями урана в экстрактах, рафинате и реэкстрактах была испытана на компьютерной

модели экстракционного каскада. При моделировании на каскад подавались возмущения в соответствии с выражением (3). На рис. 6 представлены временные диаграммы по концентрации урана в экстракте и реэкстракте.

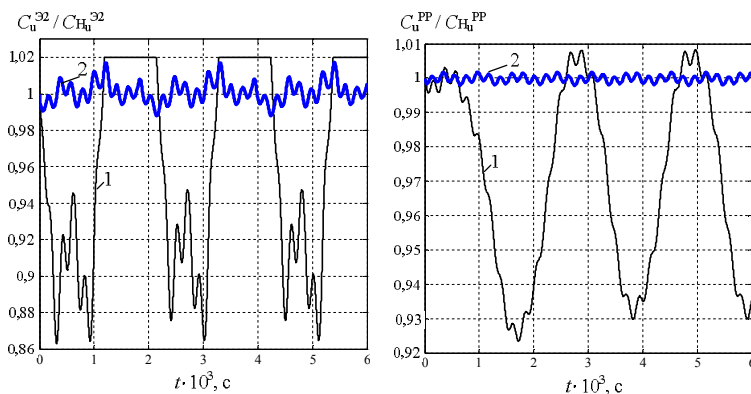


Рис. 6. Временные диаграммы относительных концентраций урана в экстракте и реэкстракте: 1 – выключена САУ концентрациями урана; 2 – включена САУ,  $C_u^{32}$  – концентрация урана в экстракте Э2,  $C_u^{PP}$  – концентрация урана в реэкстракте РР,  $C_H$  – начальная концентрация урана

Из рис. 7 следует, что при выключенной САУ концентрациями урана (работают только проектные САУ) каскад центробежных экстракторов производит бракованный продукт.

Анализ экспериментальных данных, представленных на рис. 6, показывает, что при включенной САУ среднеквадратичная ошибка управления по концентрации урана в экстракте уменьшается с 6% до 1%, а по концентрации урана в реэкстракте – с 4% до 0,2%.

При включенной САУ содержание молибдена в произведенном продукте (реэкстракте) в 4 раза ниже, чем при отсутствии автоматического управления концентрациями. Прирост производительности каскада по урану может составить 2–3 %.

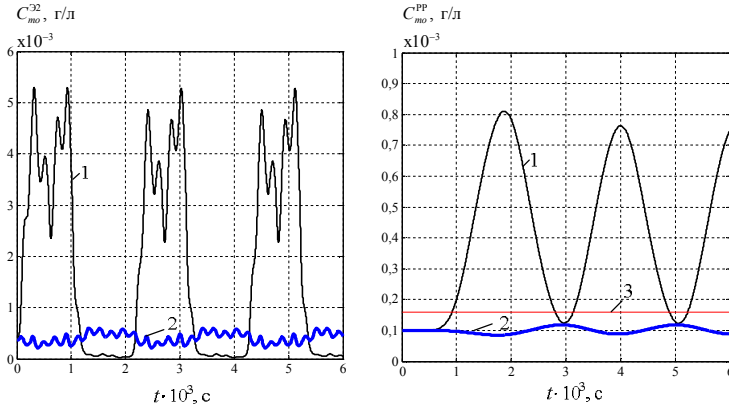


Рис. 7. Временные диаграммы концентраций молибдена в экстракте и реэкстракте: 1 – выключена САУ; 2 – включена САУ; 3 – максимальное допустимое значение концентрации молибдена в реэкстракте,  $C_{mo}^{\text{Э}2}$  – концентрация молибдена в экстракте Э2,  $C_{mo}^{\text{PP}}$  – концентрация молибдена в реэкстракте РР

Для компьютерного испытания алгоритма управления в жестких условиях подавались возмущения в соответствии с выражением (8).

$$(8) \quad \begin{cases} \Delta C_u^{\text{BФ1}}(t) = 50 \sin(0,003t + \pi) + \frac{50}{2} \sin(0,009 + \pi) + \\ + \frac{50}{3} \sin(0,03t + \pi), \text{ при } t < 1000, \\ \Delta C_u^{\text{BФ1}}(t) = 50 \sin(0,003t + \pi) + \frac{50}{2} \sin(0,009 + \pi) + \\ + \frac{50}{3} \sin(0,03t + \pi) - 200, \text{ при } t \geq 1000. \end{cases}$$

На рис. 8 представлены временные диаграммы расходов ОФ, ВФ1 при включенном и отключенном алгоритме расчета расхода ОФ, а на рис. 9 – переходные процессы по концентрациям урана и молибдена.

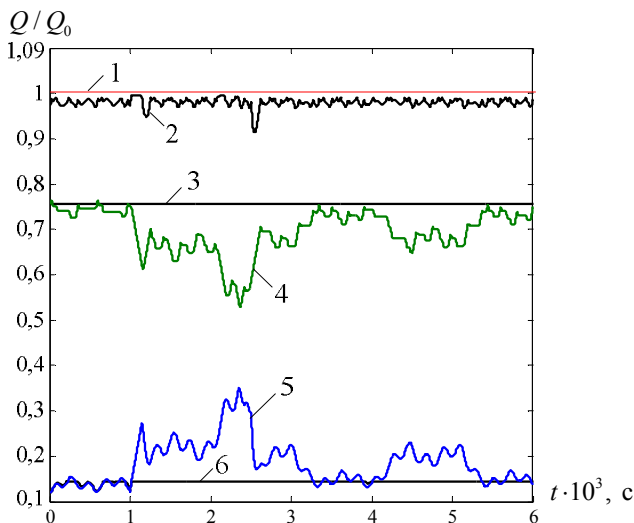


Рис. 8. Временная диаграмма расходов ВФ1 и ОФ: 1 – максимальная производительность; 2 – реальная производительность при включенном алгоритме расчета расхода ОФ; 3 – расход ОФ при отключенном алгоритме расчета; 4 – расход ОФ при включенном алгоритме расчета; 5 – расход ВФ1 при включенном алгоритме расчета; 6 – расход ВФ1 при отключенном алгоритме расчета расхода ОФ

Разработанный алгоритм расчета расхода ОФ позволяет удерживать средние значения концентраций урана и молибдена в выходных продуктах на одних и тех же уровнях (при 50%-х возмущениях по концентрации урана в исходном продукте).

Предлагаемый алгоритм позволяет существенно расширить грубость системы автоматического управления экстракционным каскадом, а именно при больших регламентных возмущениях по концентрации урана в перерабатываемом продукте.

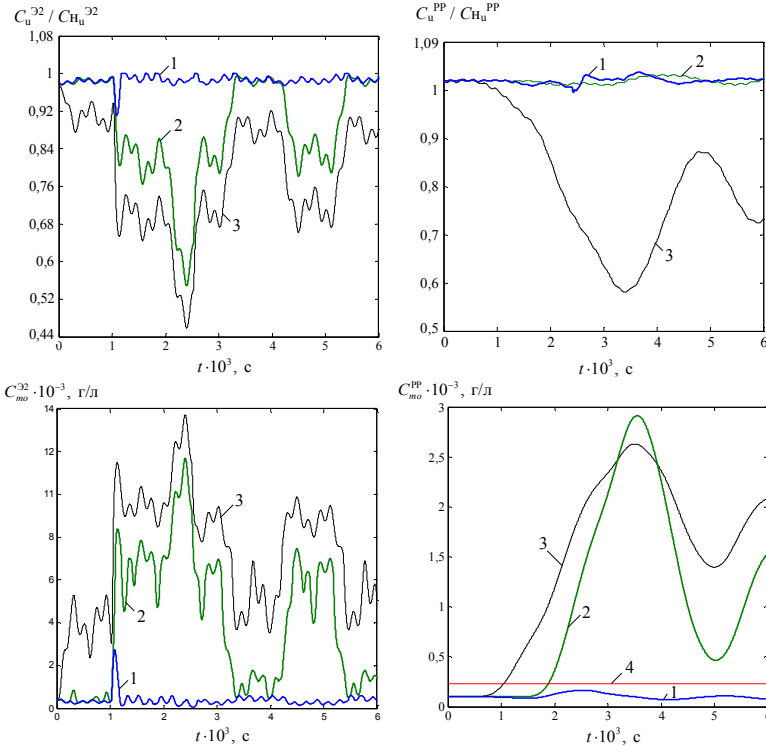


Рис. 9. Временные диаграммы концентрации урана и молибдена в экстракте и реэкстракте: 1 – при включенном алгоритме расчета расхода ОФ; 2 – при выключенном; 3 – при отсутствии управления концентрациями; 4 – предельно допустимое содержание Мо

### 5. К вопросу о синтезе адаптивной системы автоматического управления экстракционным каскадом

Информационная структурная схема линейной математической модели экстракционного блока в окрестностях  $\pm 10\%$  от рабочей точки приведена на рис. 10.

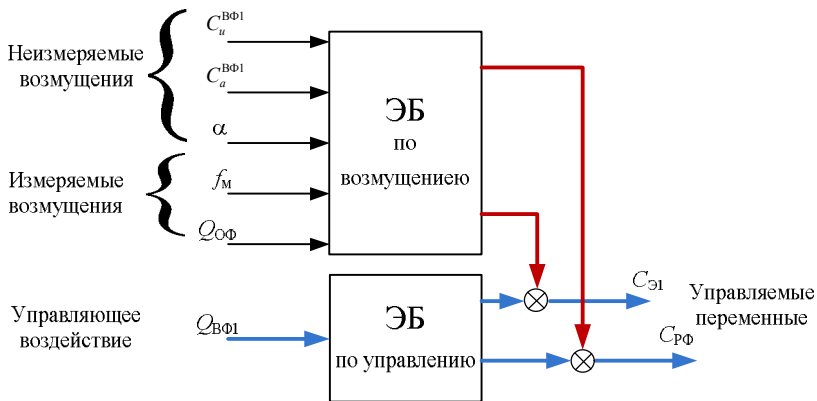


Рис. 10. Информационная структурная схема линейной модели  
 ЭБ:  $C_a^{ВФ1}$  – концентрация азотной кислоты в ВФ1;  
 $\alpha$  – содержание ТБФ в ОФ;  $f_m$  – частота вращения мешалок  
 центробежных экстракторов

Под неизмеряемыми возмущениями на рис. 10 приняты технологические переменные, неизмеряемые в режиме реального времени. Таким образом, возмущающие воздействия являются случайными процессами с неизвестными статистическими характеристиками. При этом возмущения ограничены технологическим регламентом. Так как ограниченные возмущения при больших амплитудах приводят к изменению параметров объекта управления, то эти параметры относятся к неопределенным, ограниченным по модулю.

При больших возмущающих воздействиях по концентрации урана, азотной кислоты в перерабатываемом продукте, емкости органической фазы по урану происходит существенное смещение рабочей точки, что приводит к существенным изменениям параметров линейной модели. Например, при изменении концентрации урана в перерабатываемом продукте на 50% коэффициент передачи изменяется в 2 раза, суммарная постоянная времени – в 4 раза, транспортное запаздывание – в 12 раз (см.

рис. 3). Как было отмечено ранее, экстракционный блок является нестационарным сложным объектом управления.

Построение систем, обеспечивающих заданное качество управления при существенной нестабильности параметров объекта управления, затруднительно без применения адаптивных систем управления. Значительный вклад в развитие теории адаптивного управления был сделан советскими учеными В.Я. Катковником, А.А. Красовским, Б.М. Петровым, А.А. Первозванским, Г.С. Поспеловым, В.Ю. Рутковским, В.В. Солодовниковым, А.А. Фельдбаумом, В.Н. Фоминым, Я.З. Цыпкиным, В.А. Якубовичем и др.

Автором выделены следующие современные эффективные подходы управления сложными технологическими процессами:

1) субоптимальные  $H_2$  – и  $H_\infty$  – системы управления (робастное управление сложными объектами с априорно известными параметрами) [1, 2, 18, 31, 32];

2) субоптимальное адаптивное управление с прогнозирующей моделью / *Model Predictive Control (MPC* – универсальное управление в условиях неопределенности параметров объекта управления и возмущений при возможности создания явной адаптивной модели объекта управления) [34];

3) нечеткие нейросетевые алгоритмы управления / нейро-нечеткий подход управления (универсальное управление в условиях неопределенности параметров объекта управления и возмущений) [3, 4, 17, 20, 22, 30].

4) гибридные системы (совмещение п.п. 1–3).

В адаптивных системах выделяют два контура – основной контур и контур адаптации. В случае построения САУ основными технологическими переменными имеется ряд ограничений (см. раздел 3), которые существенно сужают возможности построения основных контуров управления до ПИД-регуляторов. В работе [15] обоснована возможность применения ПИД-регуляторов для управления концентрациями экстрактов, рафинатов и реэкстрактов. С другой стороны, к контуру адаптации таких ограничений нет. Программное обеспечение этого контура не требует жесткого режима реального времени и может быть

реализовано, например, на системе с платформой *MS Windows* (сервер или отдельный промышленный компьютер). В этом случае также нет жесткой привязки к программному обеспечению нижнего уровня.

*MPC*-подход требует существенных вычислительных ресурсов при управлении объектами, подобными рассматриваемому. Оптимизатор и прогнозирующая модель должны работать в темпе с управляемым процессом, и их затруднительно разделить на две независимые подзадачи, как, например, в случае адаптивных систем с основным контуром управления и контуром адаптации. Поэтому его применение в данном случае затруднительно.

В нашем случае применение поисковых систем, частотного адаптивного управления затруднено вследствие необходимости использования тестовых сигналов и дополнительного раскачивания объекта управления. Поэтому, в первую очередь, актуально рассмотреть беспоисковые адаптивные системы. Использование активно обсуждаемого метода рекуррентных целевых неравенств [5] затруднительно из-за невозможности выполнения условия ограничения возмущений [5] и наличия запаздывания в канале управления концентрациями. Для решения данной проблемы подходят гибридные системы управления. Анализ литературы показал, что динамические свойства системы с ПИД-регулятором существенно улучшаются при использовании гибридного регулятора на базе нечетких высказываний [27, 30]. Например, когда нечеткий регулятор производит подстройку коэффициента передачи ПИД-регулятора в зависимости от величины ошибки регулирования. В работе [25] система нечеткого вывода используется для построения нечеткой экспертной системы, определяющей оптимальные настройки ПИД-регулятора в условиях нестационарности объекта управления и наличия ограниченных возмущений с неизвестными статистическими параметрами. В системе нечеткого вывода используется ошибка регулирования, ее интеграл и производная. Нечеткий логический вывод осуществлен по алгоритму Мамдани [22, 24]. Формирование функций принадлежности и базы правил осуще-



ствляется человеком-экспертом и создает ряд трудностей. Для этих целей можно использовать нейро-нечеткие системы с автоматизированными способами обучения [4, 17, 20, 22, 24], что позволит снизить субъективную сторону создания нечетких правил, функций принадлежности и т.д.

### 6. Гибридная нейро-нечеткая адаптивная система автоматического управления экстракционным блоком

С целью улучшения динамических характеристик, устойчивого управления с заданным качеством в условиях нестабильности параметров объекта управления, действия различного рода возмущений и помех, допускаемых технологическим регламентом, предложено модифицировать САУ экстракционным блоком, как показано на рис. 11.

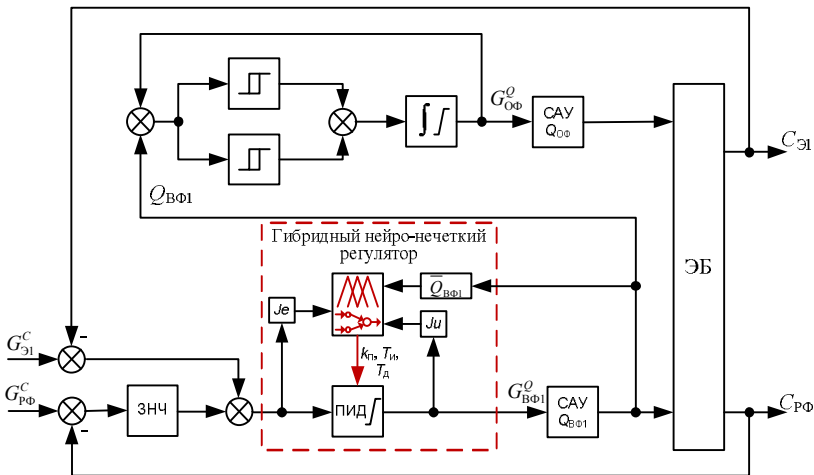


Рис. 11. Гибридная нейро-нечеткая адаптивная САУ концентрации урана в экстракте и рафинате

Ключевое значение с точки зрения адаптивного и оптимального управления играет минимизируемый функционал. Нередко данный функционал представляют в виде функционала

обобщенной работы (ФОР) [34], предложенного академиком А.А. Красовским. Компьютерным моделированием различных вариантов САУ экстракционным каскадом установлено, что обеспечение среднеквадратичного отклонения концентраций урана в экстрактах на уровне 2% от заданного значения обеспечивает наименьшее количество примесей в реэкстракте и дает прирост производительности. Поэтому в системе (см. рис. 11) целью управления является стабилизация концентрации урана в экстракте Э1. Это означает, что в качестве целевого функционала может выступать ФОР, записанный в следующем виде:

$$(9) \quad Jc = \sum_{i=k}^{k+he} (\varepsilon_i)^2 + \sum_{i=k}^{k+hu} (u_i - u_k)^2,$$

где  $k = 1, 2, \dots, \infty$ ;  $\varepsilon_i$  – ошибка управления концентрацией урана в экстракте Э1, %;  $u_i$  – управляющее воздействие, %;  $he$  – интервал оптимизации по ошибке управления;  $hu$  – интервал оптимизации по управлению. В данной работе предложено разбить ФОР (9) на две части:

$$(10) \quad Je = \sqrt{\frac{\sum_{i=k}^{k+he-1} (\varepsilon_i)^2}{he-1}} \leq \Delta C_{Э1}, \Delta C_{Э1} = 2 (\%),$$

$$(11) \quad Ju = \sqrt{\frac{\sum_{i=k}^{k+hu-1} (u_i - u_k)^2}{hu-1}} \leq \Delta u, \Delta u = 6 (\%),$$

где  $\Delta C_{Э1}$  – допустимое среднеквадратичное отклонение концентрации урана в экстракте Э1 от заданного значения, %;  $\Delta u$  – допустимое среднеквадратичное изменение управляющего воздействия за интервал оптимизации по управлению. Величина  $\Delta u$  определялась экспериментально, чтобы достигалась цель (10) и приемлемое быстродействие системы.

Наибольшее распространение в настоящее время получила архитектура нечеткой нейросети вида Тагаки–Сугено–Канга (TSK), например генерируемая методом Янги в *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)* пакета *Matlab* [17, 22, 24]. Несомненным достоинством *ANFIS* является практически полная

автоматизация процесса создание нечеткой нейросети. Оптимизатор/адаптер системы (см. рис. 11) реализован с применением *ANFIS*.

В различных рабочих точках по расходу ВФ1 (в соответствии с рис. 3) был проведен параметрический синтез ПИД-регулятора следующими методами: оптимального модуля, Куна, Копеловича, Копеловича–Шаркова, аperiodической устойчивости, динамической компенсации. В каждой рабочей точке из полученных параметров ПИД-регулятора были выбраны параметры, обеспечивающие наилучшие прямые показатели качества управления (время регулирования, динамический коэффициент регулирования) и грубость. Таким образом, были получены сеточные функции  $*k_i^n(Q_i^{ВФ1})$ ,  $T_i^n(Q_i^{ВФ1})$ ,  $T_i^d(Q_i^{ВФ1})$ . С целью повышения точности управления выполнено усиление  $k_i^n(Q_i^{ВФ1}) = 10 * k_i^n(Q_i^{ВФ1})$ . С использованием этих сеточных функций были получены обучающие данные для *ANFIS* объемом  $n = 100$ .

Нейро-нечеткие сети были сгенерированы с помощью *ANFIS* для случая трех функций принадлежности треугольного типа [22, 24]. Увеличение числа функций принадлежности, усложнения их формы, увеличение  $n$  более 100 точек в массиве не дало существенного эффекта в снижении ошибки аппроксимации. Экспериментально установлено, что ошибка аппроксимации таблично заданных зависимостей с помощью нейро-нечетких сетей, приведенная к диапазону их изменения, не превысила 0,01% [17].

Из представленного на рис. 12 переходного процесса следует, что САУ с гибридным регулятором обеспечивает наилучшее качество управления: динамический коэффициент регулирования меньше в 6 раз, время регулирования меньше в 2 раза по сравнению с системой на основе ПИД-регулятора с постоянными параметрами настройки.

На рис. 13 приведены временные диаграммы концентраций урана в экстракте Э1 при непрерывных возмущениях (8) и работе САУ концентрацией урана в экстракте и рафинате с адаптацией и без нее.

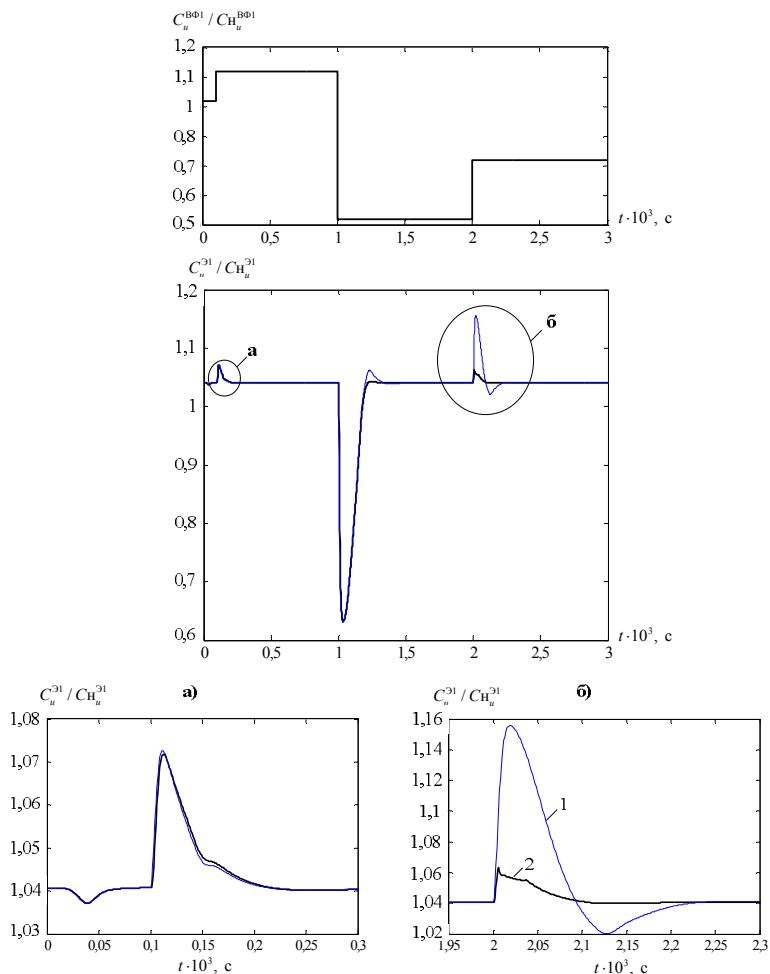


Рис. 12. Переходные процессы в САУ концентрацией урана в экстракте и рафинате: 1 – САУ без адаптации; 2 – адаптивная САУ

Разработанная гибридная нейро-нечеткая САУ по сравнению с системой без адаптации позволяет снизить среднеквадратичное отклонение концентрации урана в экстракте с 3% до 0,5%.

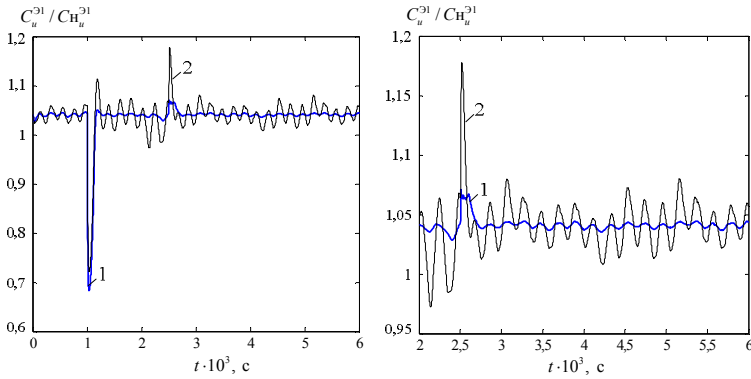


Рис. 13. Временная диаграмма концентрации урана в экстракте Э1: 1 – адаптивная САУ; 2 – САУ без адаптации

## 7. Выводы

1. Перспективным подходом, позволяющим повысить эффективность автоматического управления сложными технологическими процессами в условиях ограниченных вычислительных возможностей управляющих контроллеров, является применение гибридных нейро-нечетких адаптивных систем автоматического управления.

2. В работе предложена система автоматического управления концентрациями урана в экстрактах, рафинате и реэкстрактах каскада центробежных экстракторов, алгоритм которой автоматически рассчитывает заданные значения расходов водной и органической фаз.

3. Предложено эффективное решение в условиях ряда неопределенностей по параметрам объекта управления и возмущениям построения контура прямой адаптации с применением аппарата теории нечетких множеств и нечеткой логики, нечетких нейронных сетей.

4. Для эффективного адаптивного управления каскадом впервые предложено использовать гибридную нейро-нечеткую

систему автоматического управления концентрациями урана в экстракте и рафинате.

5. Для решения проблемы субъективного выбора постулируемых нечетких правил, вида и параметров функций принадлежности в системах автоматического управления с нечетким выводом применена автоматизированная система *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System* пакета *Matlab*.

6. Проведенные модельные исследования показали малую чувствительность разработанной системы автоматического управления к нестабильности параметров объекта управления.

7. Достигнута цель – эффективное управление экстракционным каскадом, а именно стабилизация концентраций в экстракте, рафинате и реэкстракте на заданном уровне со среднеквадратичным отклонением не более 1–3%. Указанное обеспечивает снижение содержания молибдена в произведенном продукте не менее чем в 2 раза и повышение производительности на 2–3%.

8. Применение предложенной гибридной нейро-нечеткой адаптивной системы автоматического управления концентрациями урана в экстракте и рафинате позволяет существенно снизить влияние человеческого фактора за счет более существенной грубости и устойчивости по сравнению с классическими системами автоматического управления на основе ПИД-регуляторов.

*Поисковые научно-исследовательские работы выполнены в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.*

*Результаты внедрены на радиохимическом заводе ОАО «Сибирский химический комбинат» в рамках выполнения хозяйственных работ.*

### **Литература**

1. АЛЕКСАНДРОВ А.Г., ЧЕСТНОВ В.Н. *Синтез многомерных систем заданной точности I. Применение процедур LQ-оптимизации* // Автоматика и телемеханика. – 1998 – №7. – С. 124–138.

2. АЛЕКСАНДРОВ А.Г., ЧЕСТНОВ В.Н. *Синтез многомерных систем заданной точности II. Применение процедур  $H_\infty$ -оптимизации* // Автоматика и телемеханика. – 1998 – №8. – С. 124–138.
3. АЛИЕВ Р.А., ЦЕРКОВНЫЙ А.Э., МАМЕДОВА Г.А. *Управление производством при нечеткой исходной информации.* – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 240 с.
4. БЕЛОГЛАЗОВ Д.А. *Разработка и исследование методов синтеза адаптивных регуляторов на основе нейро-нечетких сетевых структур:* Автореф. дис. канд. техн. наук. – Таганрог, 2011. – 19 с.
5. БОНДАРКО В.А. *Дискретизация динамических систем и адаптивное управление:* Автореф. дис. д-р физ.-мат. наук. – Санкт-Петербург, 2010. – 32 с.
6. ГОРЮНОВ А.Г., ГОРЮНОВА Н.Н., РОГОЗНЫЙ Д.Г. *Повышение эффективности процесса аффинажа урана путем качественного управления каскадом центробежных экстракторов* // Научно-технический вестник Поволжья. – 2011 – №5. – С. 111–114.
7. ГОРЮНОВ А.Г. *Динамическая модель неравновесного многокомпонентного экстракционного процесса в смесительной камере центробежного экстрактора* // Научно-технический вестник Поволжья. – 2011 – №4. – С. 129–132.
8. ГОРЮНОВ А.Г., ГОРЮНОВА Н.Н., РОГОЗНЫЙ Д.Г. *Повышение эффективности технологического процесса аффинажа концентратов природного урана путем качественного управления процессом* // Известия вузов. Физика. – 2012 – Т. 55, №2/2. – С. 34–37.
9. ГОРЮНОВ А.Г., ЛИВЕНЦОВ С.Н., РОГОЗНЫЙ Д.Г. ЧУРСИН Ю.А. *Динамическая модель многокомпонентного неравновесного экстракционного процесса в пульсационной колонне* // Радиохимия. – 2011. – Т. 53, №3. – С. 237–241.
10. ГОРЮНОВ А.Г., ЛИВЕНЦОВ С.Н., ЧУРСИН Ю.А. *Разработка модели процесса многокомпонентной экстракции как объекта управления* // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314, №5. – С. 75–80.

11. ГОРЮНОВ А.Г., ЛИВЕНЦОВ С.Н., ЧУРСИН Ю.А. *Система автоматизированного управления экстракционной колонной* // Известия Томского политехнического университета. – 2007 – Т. 311, №5. – С. 35–39.
12. ГОРЮНОВ А.Г., ЧУРСИН Ю.А., РОГОЗНЫЙ Д.Г., ШЕНЦОВ Э.Ю., МИХАЛЕВИЧ С.С. *Разработка модели системы экстракционных колонн установки по переработке урановых концентратов как объекта управления* // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317, №3. – С. 61–68.
13. ГОРЮНОВ А.Г., ЧУРСИН Ю.А., ТУРЕЦКОВ К.В. *Система управления экстракционной колонной* // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2009. – №1. – С. 56–65.
14. ГРОМОВ Б.В. *Введение в химическую технологию урана: учебник для вузов.* – М.: Атомиздат, 1978. – 336 с.
15. ГОРЮНОВ А.Г., ШЕНЦОВ К.Э. *Исследование экстракционного блока центробежных экстракторов как объекта управления* // Известия вузов. Физика. – 2012. – Т. 55, №2/2. – С. 106–110.
16. ЗОТОВ М.Г. *Многокритериальное конструирование систем автоматического управления.* – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. – 375 с.
17. КАРПЕНКО А.П., МООР Д.А., МУХЛИСУЛЛИНА Д.Т. *Многокритериальная оптимизация на основе нейро-нечеткой аппроксимации функции предпочтений лица, принимающего решения* // Наука и образование. – 2010. – №ФС77-30569. – 21 с.
18. КОЗЛОВ В.Н., КУПРИЯНОВ В.Е., ШАШИХИН В.Н. *Управление энергетическими системами. Теория автоматического управления* / Под ред. В.Н. Козлова. – СПб: Изд-во политехн. ун-та, 2008. – 255 с.
19. КОЗЫРЕВ А.С., ШИКЕРУН Т.Г., РЯБОВ А.С., ШАМИН В.И., МИХАЙЛОВА Н.А., СКУРАТОВА М.В. *Интенсификация процессов разделения высококонцентрированных растворов уранила и тонкодисперсных твёрдых*



- взвесей* // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311, №3. – С. 15–19.
20. КОМАРЦЕВА Л.Г. *Исследование нейро-сетевых и гибридных методов и технологий в интеллектуальных системах поддержки принятия решений*: Диссертация д-р техн. наук. – Калуга, 2003. – 438 с.
  21. КОРОТКЕВИЧ В.М., ЛАЗАРЧУК В.В., ШИКЕРУН Т.Г. и др. *Экстракционная переработка концентрированных растворов уранилнитрата с высоким содержанием примесей* // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311, №3. – С. 25–29.
  22. КРУГЛОВ В.В., БОРИСОВ В.В. *Искусственные нейронные сети. Теория и практика*. – 2-е изд, стереотип. – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 382 с.
  23. КУЗНЕЦОВ Г.И., ПУШКОВ А.А., КОСОГОРОВ А.В. *Центробежные экстракторы ЦЕНТРЭК*. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева. – 214 с.
  24. ЛЕОНЕНКОВ А.В. *Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH*. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
  25. МИХАЙЛЕНКО В.С., ЛОЖЕЧНИКОВ В.Ф. *Методы настройки нечеткого адаптивного ПИД-регулятора* // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы (ААЭКС). – 2009. – №2. – С. 174–179.
  26. *Программно-технический комплекс «УМИКОН»* / Официальный сайт компании ООО «УМИКОН». – URL: <http://www.umikon.ru> (дата обращения 12.05.2012).
  27. ПУПКОВ К.А. и др. *Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления*: Учебник / Под ред. Н.Д. Егупова, издание 2-ое, стереотипное. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 744 с.
  28. Патент РФ № 2009104172/06, 20.03.2010.
  29. ТУРАЕВ Н.С., ЖЕРИН И.И. *Химия и технология урана*. – М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2006. – 396 с.
  30. ТЯТЮШКИНА О.Ю. *Проектирование робастных нечетких регуляторов в условиях неопределенности исходной инфор-*

машии: Автореф. дис. канд. техн. наук наук. – Дубна, 2011. – 26 с.

31. ЧЕСТНОВ В.Н. *Синтез многомерных систем заданной точности по среднеквадратичному критерию* // Автоматика и телемеханика. – 1998 – №12 – С. 109–117.
32. ЧЕСТНОВ В.Н. *Синтез цифровых  $H_\infty$ -регуляторов состояния многомерных систем заданной точности* // Автоматика и телемеханика. – 2005. – №8. – С. 46–51.
33. GORYUNOV A.G., MIKHAYLOV V.S. *The automatic control system of a multi-component nonequilibrium extraction process in the pulse column* // Journal of Process Control. – 2012. – №22. – P. 1034–1043.
34. RAWLIGS J.B. *Tutorial Overview of Model Predictive Control* // IEEE Control System Magazine. – 2000. – Special Section Industrial Process Control. – P. 38–52.

## **AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR CENTRIFUGAL EXTRACTOR CASCADE**

**Alexsey Goryunov**, National Research Tomsk Polytechnic University, Institute of Physics and Technology, Department of Electronics and Automation of Nuclear Plants, assistant professor (alex1479@mail.ru).

*Abstract: The automatic control system of uranium concentration in extract, raffinate and reextract of centrifugal extractor cascade is suggested. Control algorithms employ fuzzy logic and fuzzy neural networks. The suggested control system enjoys low sensitivity to plant parameters' instability. It helps to reduce at least twice molybdenum content in final product and to increase process performance by 2–3%.*

Keywords: affintage of uranium, centrifugal extractor, hybrid control system, fuzzy neural network.

*Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии Н. Н. Бахтадзе*