

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ КАТАЛИТИЧЕСКОГО РИФОРМИНГА БЕНЗИНОВЫХ ФРАКЦИЙ

А. М. Джамбеков, И. А. Щербатов

*Кафедра «Автоматика и управление»,
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»,
г. Астрахань, Россия; azamat-121@mail.ru*

Ключевые слова: гибридная модель; каталитический риформинг; классический ПИД-регулятор; нечеткий ПИД-регулятор; обобщенный критерий оптимальности; Парето-оптимальное решение; система оптимального управления.

Аннотация: Дана постановка задачи оптимального управления процессом каталитического риформинга, разработаны его гибридная математическая модель и методика оптимального управления данным процессом. Выполнен многокритериальный выбор системы регулирования температуры на выходе из печи. Синтезирован алгоритм определения настроек регулятора температуры на выходе из печи в различных режимах процесса каталитического риформинга. Проведен поиск Парето-оптимальных решений при управлении процессом каталитического риформинга. Получены положительные эффекты при использовании разработанной системы оптимального управления процессом каталитического риформинга.

Введение

Каталитический риформинг (КР) является важнейшим технологическим процессом современной нефтепереработки и нефтехимии. В течение последнего полувека процесс КР используется для получения высокооктанового бензина, ароматических углеводородов и водорода. Совершенствование процесса КР стимулируется постоянным введением новых требований к качеству моторных топлив и их химическому составу, в том числе и с учетом экологических соображений. Возрастающая с каждым годом актуальность совершенствования процесса КР определяется ростом потребности в высокооктановом моторном топливе. По состоянию на 2016 г. доля процессов риформинга в общем числе процессов нефтепереработки в Восточной Европе составляла 13,4 % [1].

Согласно содержанию генеральной схемы развития нефтеперерабатывающей промышленности России в перспективе до 2021 г. планируется ввести десять установок риформинга бензиновых фракций суммарной производительностью около 11 млн т/год, из них семь установок по технологии непрерывной регенерации катализатора [2].

В настоящее время мощности процесса КР в России составляют 9,3 % от суммарной мощности первичной переработки нефти. По данному показателю

Россия занимает второе место, уступая только США. Поскольку компонентный состав бензина содержит 54,1 % риформата, процесс КР на отечественных предприятиях нефтепереработки занимает ведущее место [3].

Вклад в исследование и развитие процесса КР внесли многие ученые, среди которых основатель научной школы «Интеллектуальные системы в химической технологии и профессиональном образовании» Э. Д. Иванчина. В существующих исследованиях решается задача повышения эффективности процесса КР путем разработки систем автоматического регулирования технологических параметров, а также систем оптимального управления по основным технико-экономическим показателям (доход, октановое число и пр.) [4].

Известно, что эффективность производства бензина зависит не только от повышения октанового числа выпускаемого топлива, но и снижения его себестоимости [4]. При этом, важной и до конца не решенной является научно-практическая задача построения системы управления процессом КР, обеспечивающей достижение оптимальных соотношений октанового числа бензина и производственных затрат. На данный момент практически не существует исследований, направленных на разработку методов повышения эффективности процесса КР, обеспечивающих оптимальное соотношение производственных затрат и октанового числа бензина.

В настоящем исследовании предложено в качестве целевого функционала для оптимального управления процессом КР использовать обобщенный критерий оптимальности (ОКО), включающий показатели, характеризующие октановое число бензина и производственные затраты. Большие возможности для учета влияния данных показателей на эффективность процесса КР представляет построение гибридной математической модели (ММ) данного процесса [5]. Необходимо разработка системы оптимального управления процессом КР с использованием гибридной ММ. Для определения оптимальных соотношений частных критериев управления процессом КР, таких как октановое число бензина и производственные затраты, в данной работе предложено использование известного метода поиска Парето-оптимальных решений [6].

Таким образом, разработка системы оптимального управления процессом КР, обеспечивающей достижение оптимальных по Парето соотношений октанового числа бензина и производственных затрат, является актуальной научно-практической задачей.

Постановка задачи

Целью исследования является повышение эффективности управления процессом КР путем разработки системы оптимального управления данным процессом, обеспечивающей достижение Парето-оптимальных соотношений октанового числа бензина и производственных затрат.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработка гибридной математической модели процесса КР.
2. Многокритериальный выбор автоматических систем регулирования технологических параметров процесса КР.
3. Синтез алгоритма определения настроек регулятора температуры на выходе из печи риформинга в различных режимах.
4. Разработка методики оптимального управления процессом КР.
5. Поиск Парето-оптимальных решений при управлении процессом КР.
6. Разработка системы оптимального управления процессом КР.

Проведенный анализ процесса КР как объекта управления (ОУ) позволил выделить для каждого типа переменных (входные X_{in} и выходные X_{out} , перемен-

ные состояния процесса A , управляющие U и возмущающие F воздействия) отдельные их группы, которые характеризуют октановое число бензина ON и производственные затраты Z .

Выполненный литературный обзор работ в области моделирования и управления процессом КР позволил сделать вывод о том, что преимуществом нечетких моделей процесса КР является использование неформализованной информации, без имеющейся или разработанной ММ в целях эффективного управления данным процессом. Отмечено, что отсутствует подход к управлению процессом КР, направленный на одновременное снижение производственных затрат и повышение качества бензина.

Выполнена постановка задачи оптимального управления процессом КР, отличающаяся использованием ОКО в качестве целевого функционала (1)

$$I = k_1 I_1 + k_2 I_2 = \frac{1}{T} \int_0^T \left[k_1 ON_0 \frac{1}{ON(t)} + k_2 \frac{1}{Z_0} Z(t) \right] dt \rightarrow \min, \quad (1)$$

где k_1, k_2 – весовые коэффициенты, регулирующие относительную важность критериев I_1, I_2 в отношении принятия Парето-оптимальных решений, $k_1 + k_2 = 1$, $0 < k_1 < 1$, $0 < k_2 < 1$; I_1 – критерий, обратный критерию максимизации среднего нормированного по величине ON_0 значения октанового числа ON на интервале времени $[0, T]$; I_2 – критерий минимизации среднего нормированного по величине Z_0 значения затрат Z на интервале времени $[0, T]$; T – время работы установки КР, включающее межрегенерационные и межремонтные интервалы; ON_0 – минимальное значение октанового числа ON ; Z_0 – максимальное значение затрат Z .

В общем виде сформулирована задача оптимального управления процессом КР. При заданных входных переменных X_{in} найти управляющие воздействия U , обеспечивающие минимум ОКО (1) при наложенных связях в виде гибридной ММ процесса КР и ограничениях

$$ON \geq ON_0, \quad Z \leq Z_0, \quad U \in V, \quad A \in W, \quad (2)$$

где V – множество значений управляющих воздействий U ; W – множество значений переменных состояния процесса A .

Разработка гибридной математической модели процесса каталитического риформинга

Разработана гибридная ММ процесса КР [7], которая в общем виде представлена как

$$X_{out} = F(X_{in}, A, U), \quad (3)$$

где X_{out} – вектор выходных переменных, включающий октановое число бензина ON и производственные затраты Z ; F – гибридная функция связи между переменными гибридной ММ процесса КР.

Научная новизна гибридной ММ процесса КР заключается в учете влияния параметров, характеризующих производственные затраты и октановое число бензина, на эффективность процесса и расчете значений обобщенного критерия оптимальности в зависимости от текущих значений входных переменных процесса.

В формуле (4) представлены основные выражения для описания гибридной функции F :

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{\text{out}}^i = \frac{(1 - K_{\text{lh}}^i) \left((1 - |\alpha_i - 1,15|) \lambda_{\text{fg}} Q_{\text{fg}}^i + i_i Q_{\text{r}} \right)}{Q_{\text{r}} \text{CGM} \left(R_4 \circ QR^* \right)}, \quad i = \overline{1, 3}; \\ RP_j = 1 + x_1 + x_2 + x_3 + x_1 x_2 + x_1 x_3 + x_2 x_3 + x_1^2 + x_2^2 + x_3^2, \quad j = \overline{1, 3}; \\ ON = \text{CGM} \left(RP^* \circ R_5 \right) + 0,05 \left(MR_{\text{h/r}} \right)^{-3} + 49 - 14,47 Q_V - 9,8P; \\ Z = Z_{\text{r}} + Z_{\text{e}} + Z_{\text{fg}} + Z_{\text{c}} + Z_{\text{rg}} + Z_{\text{pw}} + Z_{\text{dd}} + Z_{\text{ti,r}}, \end{array} \right. \quad (4)$$

где QR^* – качество сырья; RP_j – четкая оценка жесткости процесса в j -м реакторе; RP^* – обобщенная жесткость процесса; Q_{r} – объемный расход сырья, $\text{м}^3/\text{ч}$; $MR_{\text{h/r}}$ – мольное соотношение водород/сырье, %; λ_{fg} – удельная теплота сгорания топливного газа, $\text{Дж}/\text{м}^3$; K_{lh}^i – коэффициент потерь тепла в i -й печи; i_i – энтальпия продуктовой смеси на входе в i -ю печь, $\text{Дж}/\text{м}^3$; T_{out}^i – температура на выходе из i -й печи, $^{\circ}\text{C}$; Q_{fg}^i – объемный расход топливного газа в i -ю печь, $\text{м}^3/\text{ч}$; α_i – коэффициент избытка воздуха в i -й печи; Q_V – объемная скорость подачи сырья, ч^{-1} ; P – давление в реакторах, МПа; Z_{r} – затраты на сырье, р.; Z_{e} – затраты на электроэнергию, р.; Z_{fg} – затраты на топливный газ, р.; Z_{c} – затраты на катализаторы, р.; Z_{rg} – затраты на реагенты, р.; Z_{pw} – затраты на заработную плату производственных рабочих, р.; Z_{dd} – амортизация на полное восстановление оборудования, р.; $Z_{\text{ti,r}}$ – затраты на проведение планового ТО и ремонта оборудования, р.; Z – производственные затраты, р.; CGM – операция дефазификации нечетких множеств методом центра тяжести (*center of gravity method*); $R_4(QR^*/HCM^*)$, $R_5(RP^*/ON_0^*)$ – матрицы нечеткого отношения; ON_0^* – нечеткая оценка основного значения октанового числа ON_0 ; HCM^* – теплоемкость продуктовой смеси (*heat capacity of mixture*), лингвистическая переменная; $x_1 = T_{\text{out}}^i$; x_2 – четкая оценка качества сырья QR^* ; x_3 – четкая оценка активности катализатора AC^* .

На рисунке 1 представлены графики изменения нормированного критерия минимизации производственных затрат $I_1(t)$, нормированного критерия

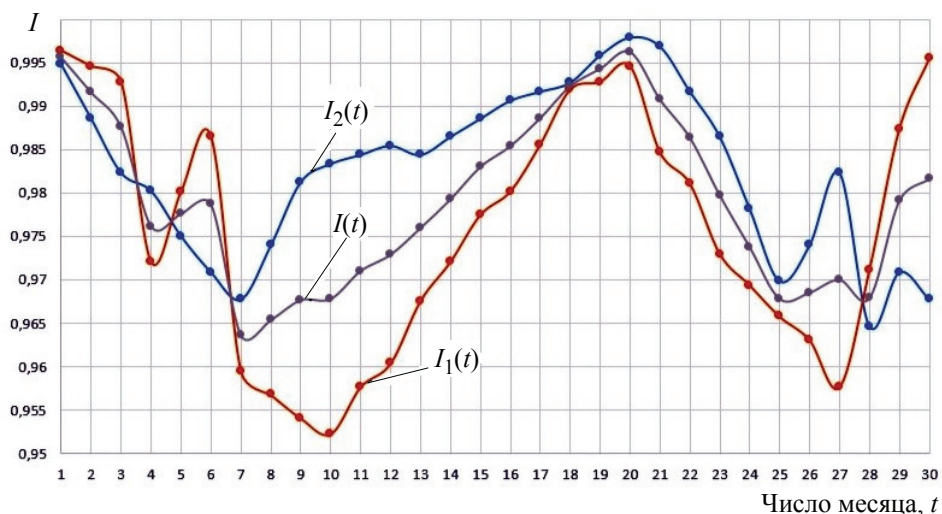


Рис. 1. Изменение нормированных критериев оптимальности процесса каталитического риформинга

обратного критерию максимизации октанового числа и ОКО $I(t)$ соответственно. Согласно (1) определение ОКО $I(t)$ по гибридной ММ (3) состоит в нахождении взвешенной суммы нормированных частных критериев $I_1(t), I_2(t)$.

Графики построены на основе гибридной ММ для типового набора входных переменных, характеризующих нормальное функционирование процесса на установке КР ЛЧ-35-11/1000, для которой определены максимальные годовые затраты 4,05 млрд р. и минимальное значение октанового числа бензина 92,83, в течение одного месяца [8].

Проверка адекватности гибридной ММ выполнена с использованием критерия Фишера. Выбор данного критерия связан с тем, что экспериментальная зависимость не имеет аномальных значений, число «опытов» равно числу значений экспериментальной кривой, поэтому нет необходимости в пересчете статистических характеристик данной выборки и использования критериев Кохрена и Стьюдента [7].

Расчетное значение критерия Фишера для выражения, определяющего затраты, равно 70,68, что превышает соответствующее табличное значение 2,69 при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и степенях свободы $f_1 = 12, f_2 = 12$; для выражения, определяющего октановое число, значение данного критерия составило 15,48, что превышает соответствующее табличное значение 8,69 при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и степенях свободы $f_1 = 16, f_2 = 3$. Максимальная ошибка расчетов по гибридной ММ относительно результатов экспериментов не превышает 5 %.

Многокритериальный выбор автоматических систем регулирования технологических параметров процесса каталитического риформинга

На основе метода нечетких парных сравнений разработаны математические выражения для многокритериального выбора автоматической системы регулирования (АСР) температуры на выходе из печи из пяти альтернатив по семи критериям [9]. Нечеткое решение \tilde{D} по схеме Беллмана–Заде определяется путем пересечения частных критериев

$$\tilde{D} = \bigcap_{i=1}^7 \tilde{k}_i = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\min_{i=1,7} \mu_{k_i}(x_1)}{x_1}, \frac{\min_{i=1,7} \mu_{k_i}(x_2)}{x_2}, \frac{\min_{i=1,7} \mu_{k_i}(x_3)}{x_3}, \\ \frac{\min_{i=1,7} \mu_{k_i}(x_4)}{x_4}, \frac{\min_{i=1,7} \mu_{k_i}(x_5)}{x_5} \end{array} \right\}, \quad (5)$$

где $\mu_{k_i}(x_j)$ – функция принадлежности (ФП) элемента k_i нечеткому множеству X ; «~» – обозначение нечеткой величины.

В результате расчета по выражениям получено, что наиболее полно соответствует всем критериям АСР с нечетким регулятором ПИД-типа МТ20-V-E FOTEK + PID Fuzzy, соответствующая максимальной ФП нечеткого решения, равной 0,954. Выполнена проверка адекватности данных выражений с использованием критерия Фишера.

Разработано программное обеспечение (ПО) для многокритериального выбора средств управления процессом КР на языке C#, которое позволяет выбрать наилучшую АСР температуры на выходе из печи риформинга из пяти альтернатив по семи критериям. С использованием ПО и базы данных выбрана АСР температуры на выходе из печи с нечетким регулятором ПИД-типа МТ20-R-E МТ-20E FOTEK + PID Fuzzy.

Синтез алгоритма определения настроек регулятора температуры на выходе из печи риформинга в различных режимах

Процесс подогрева в печи риформинга рассмотрен в качестве ОУ. Определение настроек регулятора температуры на выходе из печи осуществляется при действии на ОУ возмущения – перепада температуры в печи ΔT [10]. Научная новизна алгоритма заключается в количественном учете режимных параметров в передаточной функции возмущения и в определении настроек регулятора температуры на выходе из печи риформинга в зависимости от текущих режимных параметров. Представим пошаговое описание данного алгоритма.

Шаг 1. Задание соответствующих передаточных функций ОУ и действующих на ОУ возмущений $P(s)$ и $H(s)$.

Шаг 2. Определение множества режимов процесса Y и задание режима $y_0 \in Y$ при изменении параметров передаточной функции возмущения $H(s)$.

Шаг 3. При выборе классического ПИД-регулятора переход к шагу 4. Иначе, при выборе нечеткого ПИД-регулятора – к шагу 5.

Шаг 4. Определение множества настроек классического ПИД-регулятора R с помощью метода Циглера–Никольса для заданного режима $y_0 \in Y$.

Шаг 5. Определение множества настроек нечеткого ПИД-регулятора R с использованием методики расчета нечеткого регулятора для заданного режима $y_0 \in Y$.

Шаг 6. Исследование переходных процессов в АСР температуры на выходе из печи риформинга для заданного режима $y_0 \in Y$.

Шаг 7. Определение оптимальных настроек регулятора температуры $R_{opt} \in R$ путем сравнительного анализа показателей качества переходных процессов.

Для определения настроек нечеткого ПИД-регулятора температуры на выходе из печи выполнено математическое описание ОУ и возмущения в виде передаточных функций, а также определены настройки ПИД-регулятора в системе MATLAB.

Для регулирования температуры на выходе из печи риформинга обычно применяют классические ПИД-регуляторы. При этом операторы процесса КР накапливают опыт, выраженный в виде «лингвистических правил управления» типа «Если ошибка регулирования мала, то управляющее воздействие большое». Большие возможности для обработки данных правил имеют методы теории нечетких множеств [11]. Исходя из опыта использования нечетких регуляторов на различных ОУ, возможна разработка нечеткого ПИД-регулятора на основе базы правил регулирования температуры на выходе из печи риформинга.

В результате сравнения качества переходных процессов в АСР с классическим и нечетким ПИД-регуляторами (рис. 2) получены положительные эффекты от использования нечеткого ПИД-регулятора: уменьшение перерегулирования в 10,4 раза и квадратичного интегрального критерия – в 4,3 раза.

На основе алгоритма определения настроек регулятора температуры на выходе из печи в различных режимах процесса КР, реализованного в системе MATLAB, определены настройки нечеткого ПИД-регулятора МТ20-Р-Е МТ-20Е FOTEK + PID Fuzzy: ФП типа *gaussmf*; система нечеткого вывода Мамдани; $P = 0,345$, $I = 0,017$, $D = 1,725$, обеспечивающие достижение наилучших показателей качества переходного процесса: перерегулирования 0,005 °С и квадратичного интегрального критерия 1216.

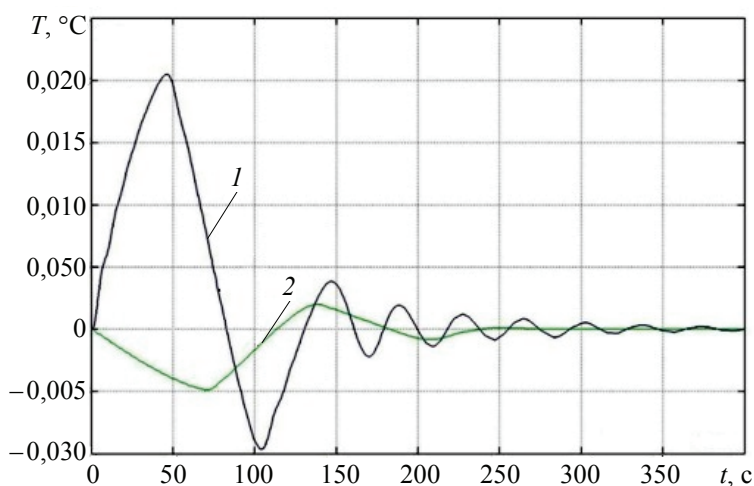


Рис. 2. Переходные процессы в АСР температуры на выходе из печи: 1, 2 – с классическим и нечетким ПИД-регуляторами соответственно

Разработка методики оптимального управления процессом каталитического риформинга

Обосновано решение задачи оптимизации процесса КР с использованием метода равномерного поиска. Для этого рассмотрена зависимость ОКО I от двух переменных – температуры газосырьевой смеси на входе в печь T_{in} и температуры газосырьевой смеси на выходе из печи T_{out} [12].

Алгоритм оптимизации реализован в виде программного обеспечения (ПО) на языке C#. В результате расчета по алгоритму получены следующие оптимальные значения параметров процесса КР: температура на входе в печь $T_{in}^{opt} = 180$ °С, температура на выходе из печи $T_{out}^{opt} = 210$ °С, ОКО $I_{opt} = 0,964$.

На основе алгоритма оптимизации процесса КР разработана методика оптимального управления данным процессом. Научная новизна методики оптимального управления процессом КР заключается в учете экспертной информации при формализации нечетких целей и ограничений при управлении процессом и определении оптимальных управляющих воздействий по схеме Беллмана–Заде в зависимости от текущих значений входных переменных процесса. Данная методика предназначена для оптимального управления процессом КР при нечеткой цели и нечетких ограничениях, которые задаются оператором в виде словесных высказываний (формулировок), и является расширением (дополнением) алгоритма оптимизации процесса КР на случай использования словесных формулировок при определении цели и ограничений на управление. Представим поэтапное описание данной методики.

Этап 1. Задание нечетких целей и ограничений в виде словесных высказываний (формулировок).

Нечеткой целью \tilde{G} в процедуре принятия решений при управлении процессом КР является выражение «ОКО должен быть минимальным». Одним из нечетких ограничений \tilde{C}_1 является «активность катализатора должна быть выше средней», а другим \tilde{C}_2 – «состояние печи риформинга должно быть лучше среднего».

Использование данных ограничений объясняется тем, что при повышении эффективности процесса КР необходимо поддержание удовлетворительных значений параметров катализатора и печи риформинга. Тем самым, ограничение \tilde{C}_1

служит для увеличения межрегенерационного периода, а ограничение \tilde{C}_2 предназначено для увеличения межремонтного периода [13].

Этап 2. Определение универсального множества альтернатив.

Значения альтернатив x множества X определяются величинами температуры на выходе из печи в диапазоне [100, 300] °С [14].

Этап 3. Формализация нечетких целей и ограничений в виде нечетких множеств на универсальном множестве альтернатив.

Нечеткая цель \tilde{G} и нечеткие ограничения \tilde{C}_1, \tilde{C}_2 представляют собой нечеткие множества на универсальном множестве $X = \{x\}$ [15].

Этап 4. Определение нечеткого решения по схеме Беллмана–Заде в виде нечеткого множества на универсальном множестве альтернатив.

Нечеткое решение \tilde{D} при управлении процессом КР определяется по схеме Беллмана–Заде [15] как пересечение нечеткой цели \tilde{G} и нечетких ограничений \tilde{C}_1, \tilde{C}_2

$$\tilde{D} = \tilde{G} \cap \tilde{C}_1 \cap \tilde{C}_2. \quad (6)$$

Этап 5. Определение альтернативы с максимальной ФП нечеткого решения.

Взаимосвязь между нечеткими целью \tilde{G} , ограничениями \tilde{C}_1, \tilde{C}_2 и решением \tilde{D} показана на рис. 3. На основе конфликта цели и ограничений при управлении процессом КР определяют альтернативу « x » с максимальной ФП нечеткого множества \tilde{D} . Получаем область значений ФП $\mu_D(x)$ «Решение», соответствующую множеству альтернатив для требуемых управляющих воздействий.

На основе (6) определена альтернатива $x = 212$ °С, соответствующая максимальной ФП нечеткого решения. Следовательно, при температуре на выходе из печи $x = 212$ °С достигается нечеткая цель \tilde{G} , сформулированная как «ОКО должен быть минимальным» при нечетких ограничениях \tilde{C}_1, \tilde{C}_2 .

Этап 6. Определение управляющих воздействий с использованием полученной альтернативы на основе гибридной ММ процесса КР.

Используя гибридную ММ при заданных входных переменных, получаем оптимальные управляющие воздействия при $x = 212$ °С для установки ЛЧ-35-11/1000.

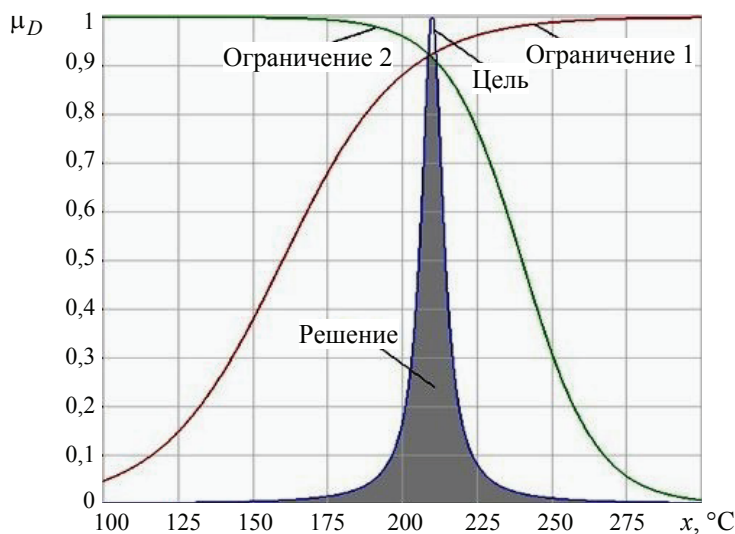


Рис. 3. Принятие решения в системе оптимального управления процессом каталитического риформинга по схеме Беллмана–Заде

На основе методики определен вектор управлений, соответствующий минимуму ОКО $I = 0,964$. Выделен вектор управлений U^z , влияющих на производственные затраты: расход сырья $G_r - 1000$ т, расход электроэнергии $G_e - 82$ МДж, расход топливного газа $G_{fg} - 25$ м³, расход катализатора $G_c - 0,02$ кг, расход реагента $G_{rg} - 0,001$ кг. Также определен вектор управлений U^{on} , влияющих на октановое число бензина: производительность центробежного компрессора $Q_{cc} - 2,1 \cdot 10^5$ м³/ч, объемный расход сырья $Q_r - 130$ м³/час, количество сбрасываемого ВСГ $Q_{hg} - 9 \cdot 10^4$ м³, объемный расход топливного газа в первую печь $Q_{fg1} - 750$ м³/ч, объемный расход топливного газа во вторую печь $Q_{fg2} - 850$ м³/ч, объемный расход топливного газа в третью печь $Q_{fg3} - 950$ м³/ч.

Выполнена программная реализация методики оптимального управления процессом КР на языке С#, которая позволяет определять вектор управлений, соответствующий минимуму ОКО. Для полученного вектора управлений определены показатели эффективности процесса КР: производственные затраты $Z = 0,825$ млрд р.; октановое число бензина $ON = 92,83$; ОКО $I = 0,964$.

Поиск Парето-оптимальных решений при управлении процессом каталитического риформинга

Если по каким-либо причинам (ограниченность сырья, материалов и пр.) невозможна полная реализация управляющих воздействий (вектора управления), соответствующих минимуму ОКО, необходимо принятие Парето-оптимальных решений из возможных альтернатив [16]. Если для альтернативы $x = 212$ °С, соответствующей минимуму ОКО, невозможна реализация вектора управлений, то необходимо определение вектора управлений для альтернатив из диапазона [205; 215] °С, при которых все равно ОКО минимален по отношению к двум другим локальным минимумам. Полученные вектора управлений для альтернатив из диапазона [205; 215] °С соответствуют значениям частных критериев I_1, I_2 , на основе которых необходимо принятие решений при управлении процессом КР.

Использование нормированных значений критериев связано с возможностью их совмещения на одной критериальной плоскости и поиска Парето-оптимальных решений (рис. 4). Значения частных критериев и ОКО определяются с использованием гибридной ММ процесса КР [7].

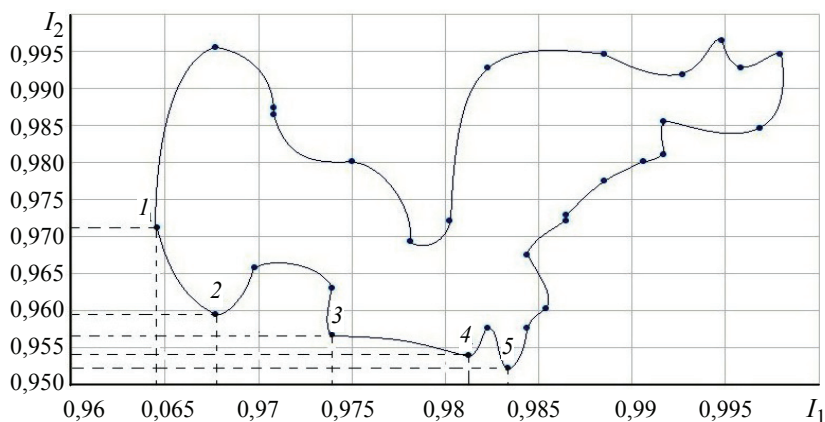


Рис. 4. Поиск оптимального решения на множестве Парето

Множество Парето (рис. 4) построено на основе методики оптимального управления процессом КР для типового набора входных переменных, характеризующих нормальное функционирование процесса на установке КР ЛЧ-35-11/1000 в течение одного месяца [8].

Исходя из рисунка 4, получено множество неулучшаемых решений Парето

$$\{I_1^1, I_2^1\}, \{I_1^2, I_2^2\}, \dots, \{I_1^i, I_2^i\}, \dots, \{I_1^5, I_2^5\}, \quad (7)$$

где $\{I_1^i, I_2^i\}$, $i = \overline{1,5}$ – значения частных критериев для i -го неулучшаемого решения.

Из (7) определено наилучшее решение (8), соответствующее минимуму ОКО,

$$\{I_1^1, I_2^1\} : I \rightarrow \min. \quad (8)$$

Оптимальное решение (8) соответствует значениям критериев: $I_1 = 0,959$; $I_2 = 0,967$; $I = 0,964$ при весовых коэффициентах $k_1 = k_2 = 0,5$. Равенство весовых коэффициентов означает, что в общем случае при производстве бензина равный приоритет имеют задачи повышения октанового числа бензина и снижения производственных затрат. Так же, могут быть рассмотрены случаи принятия Парето-оптимальных решений, когда данное равенство не соблюдается.

Разработка системы оптимального управления процессом каталитического риформинга

Разработана система оптимального управления процессом КР, структура которой представлена на рис. 5.

Объектом управления 1 является процесс КР, на который поступают входные переменные X_{in} и управляющие воздействия U . На выходе ОУ получают значения октанового числа продукта ON и производственных затрат Z .

Система оптимального управления 2 служит для управления процессом КР при нечеткой цели \tilde{G} и нечетких ограничениях \tilde{C}_1, \tilde{C}_2 , задаваемых оператором 3

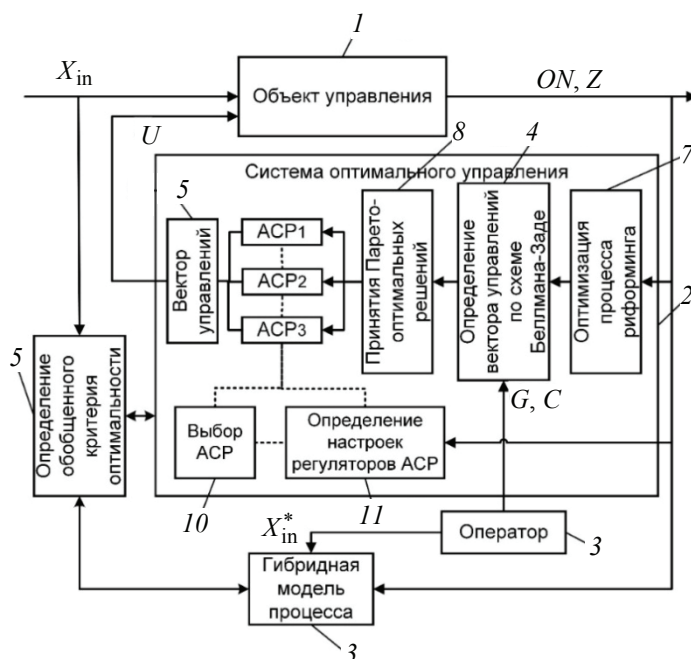


Рис. 5. Структура системы оптимального управления процессом КР

при реализации методики оптимального управления 4. Для определения ОКО 5 оператор 3 задает значения нечетких входных переменных X_{in}^* (активность катализатора, состояние печи риформинга и др.) на вход гибридной ММ процесса 6.

На основе алгоритма оптимизации процесса 7 при заданных четких ограничениях определяют альтернативу « x » – температуру на выходе из печи, при которой ОКО $I(x)$ минимален. Полученная альтернатива « x » используется для задания нечеткой цели \tilde{G} «ОКО должен быть минимальным». На основе методики оптимального управления процессом 4 с использованием схемы Беллмана–Заде определяют альтернативу « x' », отличную от « x », при которой достигается минимум ОКО $I(x)$. Разница « $x'-x$ » связана с неопределенностью информации, присутствующей в нечеткой цели и нечетких ограничениях, при которой происходит «смещение» на величину « $x'-x$ » максимума ФП нечеткого решения \tilde{D} .

Для полученной альтернативы « x' » и для альтернатив из диапазона, при котором все равно ОКО минимален по отношению к двум другим локальным минимумам, с использованием процедуры поиска Парето-оптимального решения 8 и гибридной ММ 6 определяют вектор управлений U 9, соответствующий минимуму ОКО.

На основе многокритериального выбора АСР 10 и алгоритма определения настроек регуляторов процесса КР в различных режимах 11 определяют наилучшую модель АСР и настройки регулятора для трех параметров процесса КР: температуры на выходе из печи риформинга (АСР₁); давления в реакторе риформинга (АСР₂); уровня в сепараторе риформинга (АСР₃). Для определения исходной информации при выборе АСР разработана база данных средств управления процессом КР.

Получены положительные эффекты при использовании разработанной системы оптимального управления процессом КР: снижение средних затрат на 0,33 млн р.; повышение среднего октанового числа на 0,53; снижение среднего значения обобщенного критерия оптимальности на 0,025.

Заключение

На основе современных методов оптимизации, вычислительной математики и теории управления получены новые научные результаты для теории и практики создания систем оптимального управления процессом КР.

1. Выполнена постановка задачи оптимального управления процессом КР, отличающаяся использованием ОКО в качестве целевого функционала, и позволяющая представить в общем виде гибридную ММ процесса КР в виде кортежа переменных, ограничения на данные переменные и связи между ними, а также требование к минимизации значения ОКО.

2. Разработана гибридная ММ процесса КР, отличающаяся учетом влияния параметров, характеризующих производственные затраты и октановое число бензина, на эффективность процесса, и позволяющая рассчитывать значения ОКО в зависимости от текущих значений входных переменных процесса. На основе гибридной ММ для установки КР ЛЧ-35-11/1000 получены максимальные годовые затраты 4,05 млрд р. и минимальное октановое число бензина 92,83.

3. Синтезирован алгоритм определения настроек регулятора температуры на выходе из печи в различных режимах процесса КР, отличающийся количественным учетом режимных параметров в передаточной функции возмущения, и позволяющий определять настройки регулятора температуры на выходе из печи риформинга в зависимости от текущих режимных параметров. На основе алгоритма для заданного режима процесса КР определены настройки нечеткого регулятора ПИД-типа МТ20-R-E МТ-20Е FOTEK + PID Fuzzy, обеспечивающие достижение наилучших показателей переходного процесса: перерегулирования 0,005 °С и квадратичного интегрального критерия 1216.

4. Разработана методика оптимального управления процессом КР, отличающаяся учетом экспертной информации при формализации нечетких целей и ограничений при управлении процессом и позволяющая определять оптимальные управляющие воздействия по схеме Беллмана–Заде в зависимости от текущих значений входных переменных процесса. На основе методики определен вектор управлений, соответствующий минимуму ОКО $I = 0,964$.

5. На основе методики оптимального управления процессом КР построено множество Парето-оптимальных решений для типового набора входных переменных, характеризующих нормальное функционирование процесса на установке КР ЛЧ-35-11/1000 в течение одного месяца. На множестве Парето получено пять неулучшаемых решений в двумерном критериальном пространстве, из которых выбрано наилучшее решение, соответствующее значениям критериев: $I_1 = 0,959$; $I_2 = 0,967$; $I = 0,964$ при весовых коэффициентах $k_1 = k_2 = 0,5$.

6. Разработана структура системы оптимального управления процессом КР на основе разработанных моделей и алгоритмов: многокритериального выбора средств управления процессом КР; базы данных средств управления процессом КР; алгоритма определения настроек регуляторов процесса КР в различных режимах; алгоритма оптимизации процесса КР; методики оптимального управления процессом КР; принятия Парето-оптимальных решений.

7. Выполнена оценка повышения эффективности управления процессом КР. Сравнительный анализ существующей и разработанной системы управления процессом КР позволил определить положительные эффекты при использовании разработанной системы: снижение средних затрат на 0,33 млн р.; повышение среднего октанового числа на 0,53 пункта; снижение среднего значения ОКО на 0,025.

Список литературы

1. Имашев, У. Б. Особенности развития процесса каталитического риформинга в России / У. Б. Имашев, А. А. Тюрин, Е. А. Удалова // Башкир. хим. журн. – 2009. – Т. 16. – № 4. – С. 184 – 186.

2. Рахматуллин, А. Р. Получение автомобильных бензинов с пониженным содержанием ароматических компонентов / А. Р. Рахматуллин, А. Ф. Ахметов, Э. Р. Нурмухаметова // Нефтегазовое дело. – 2014. – № 12-2. – С. 106 – 112.

3. Роль процесса каталитического крекинга в производстве высокооктановых автомобильных бензинов / Р. А. Шарипов [и др.] // Соврем. проблемы науки и образования. – 2015. – № 1-1. – С. 134.

4. Иванчина, Э. Д. Повышение технико-экономической эффективности каталитического риформинга с использованием компьютерной моделирующей системы / Э. Д. Иванчина, В. В. Дериглазов, И. К. Занин // Изв. Том. политехн. университета. Инжиниринг георесурсов. – 2011. – Т. 319, № 3. – С. 105 – 109.

5. Проталинский, О. М. Проверка достоверности первичной информации в АСУ ТП с использованием нечетких множеств / О. М. Проталинский // Изв. высших учеб. заведений. Северо-Кавказ. регион. Сер. Техн. науки. – 2003. – № 3. – С. 60.

6. Литвинская, О. С. Формализация принятия решений на основе целевого функционала / О. С. Литвинская // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2012. – № 1 (5). – С. 74 – 79.

7. Джамбеков, А. М. Управление процессом каталитического риформинга на основе экспертной информации / А. М. Джамбеков // Новые материалы и технологии: состояние вопроса и перспективы развития : сб. материалов Всерос. молодеж. науч. конф. – 2014. – С. 382 – 387.

8. Власов, С. С. Моделирование процесса отбензинивания нефти при прогнозировании показателей качества бензина / С. С. Власов, А. Г. Шумихин // Вестн. Саратов. гос. техн. университета. – 2012. – Т. 1, № 1 (63). – С. 90 – 94.

9. Джамбеков, А. М. Многокритериальный выбор систем автоматического регулирования технологических параметров в условиях неопределенности / А. М. Джамбеков // Научные исследования и перспективные проекты – 2016 : сб. тр. I науч.-практ. конф. аспирантов, преподавателей, ученых. – 2016. – С. 95 – 105.

10. Джамбеков, А. М. Нечеткая система управления процессом каталитического риформинга / А. М. Джамбеков // Прикасп. журн. : управление и высокие технологии. – 2015. – № 4 (32). – С. 268 – 280.

11. Васильева, Н. В. Построение функций принадлежности параметров технологического процесса на основе нечеткой кластеризации производственных данных / Н. В. Васильева, Э. Д. Кадыров // Записки Горного института. – 2013. – Т. 202. – С. 251 – 253.

12. Воробович, Н. П. Применение теории оптимального управления для решения многокритериальной задачи сетевого планирования с нечеткими ограничениями по ресурсам / Н. П. Воробович // Вестн. Краснояр. гос. аграр. университета. – 2009. – № 8. – С. 15 – 18.

13. Шумихин, А. Г. Классификация технологических параметров процесса каталитического крекинга в нечеткой среде / А. Г. Шумихин, И. А. Вялых // Вестн. Перм. нац. исслед. политехн. университета. Хим. технология и биотехнология. – 2009. – Т. 10. – С. 121 – 127.

14. Джамбеков, А. М. Использование информационных технологий для обеспечения автоматизированного управления процессом каталитического риформинга в условиях неопределенности / А. М. Джамбеков // Прикасп. журнал: управление и высокие технологии. – 2017. – № 2 (38). – С. 36 – 46.

15. Шумихин, А. Г. Формирование функций принадлежности для алгоритма нечеткого управления технологическим процессом каталитического крекинга / А. Г. Шумихин, И. А. Вялых // Изв. Том. политехн. университета. Инжиниринг георесурсов. – 2010. – Т. 316, № 5. – С. 132 – 136.

16. Романова, И. К. Применение аналитических методов к исследованию Парето-оптимальных систем управления / И. К. Романова // Наука и образование: науч. изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2014. – № 4. – С. 238 – 266.

Optimal Control of the Process of Catalytic Reforming of Petrol Fractions

A. M. Dzhambekov, I. A. Shcherbatov

*Department of Automation and Control, Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russia; azamat-121@mail.ru*

Keywords: catalytic reforming; classical PID controller; fuzzy PID controller; generalized optimality criterion; hybrid model; optimal control system; Pareto optimal solution.

Abstract: The problem of optimal control of the catalytic reforming process has been formulated. A hybrid mathematical model of the process of catalytic reforming has been developed. A multicriteria selection of the temperature control system at the outlet from the furnace is performed. The algorithm for determining the settings of the temperature regulator at the outlet from the furnace in various modes of the catalytic reforming process is synthesized. A method for the optimal control of the catalytic reforming process has been developed. The search of Pareto-optimal solutions for controlling the catalytic reforming process is carried out. Positive effects using the developed system of optimal control of the catalytic reforming process were obtained: a decrease in average costs by 0.33 million rubles; an increase in the average octane number by 0.53; a decrease in the average value of the generalized optimality criterion by 0.025.

References

1. Imashev U.B., Tjurin A.A., Udalova E.A. [Peculiarities of the development of the catalytic reforming process in Russia], *Bashkirskij himicheskij zhurnal* [Bashkirsky chemical journal], 2009, vol. 16, no. 4, pp. 184-186. (In Russ.)
2. Rahmatullin A.R., Ahmetov A.F., Nurmuhametova Je.R. [Obtaining motor gasolines with a reduced content of aromatic components], *Neftegazovoe delo* [Oil and gas business], 2014, no. 12-2, pp. 106-112. (In Russ.)
3. Sharipov R.A., Sidorov G.M., Zinnatullin R.R., Dmitriev Ju.K. [The role of the catalytic cracking process in the production of high-octane gasolines], *Sovremennye problemy nauki i obrazovanija* [Modern problems of science and education], 2015, no. 1-1, p. 134. (In Russ.)
4. Ivanchina Je.D., Deriglazov V.V., Zanin I.K. [Increase of technical and economic efficiency of catalytic reforming using computer modeling system], *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Engineering georesources], 2011, vol. 319, no. 3, pp. 105-109. (In Russ.)
5. Protalinskij O.M. [Verification of the reliability of primary information in the process control system using fuzzy sets], *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Serija: Tehnicheskie nauki* [News of Higher Educational Establishments. The North Caucasus region. Series: Engineering], 2003, no. 3, p. 60. (In Russ.)
6. Litvinskaja O.S. [Formalization of decision-making on the basis of the target functional], *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastojashhego plus* [XXI century: the results of the past and the problems of the present plus], 2012, no. 1 (5), pp. 74-79. (In Russ.)
7. Dzhambekov A.M. [Controlling the process of catalytic reforming on the basis of expert information], *Novye materialy i tehnologii: sostojanie voprosa i perspektivy razvitiya sbornik materialov Vserossijskoj molodezhnoj nauchnoj konferencii* [New materials and technologies: the state of the issue and prospects for development], Proceedings of the All-Russian Youth Scientific Conference, 2014, pp. 382-387. (In Russ.)
8. Vlasov S.S., Shumihin A.G. [Modeling the process of oil stripping while predicting the quality of gasoline], *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Saratov State Technical University], 2012, vol. 1, no. 1 (63), pp. 90-94. (In Russ.)
9. Dzhambekov A.M. [Multicriteria choice of automatic control systems for technological parameters in conditions of uncertainty], *Nauchnye issledovanija i perspektivnye proekty – 2016* [Scientific researches and perspective projects – 2016], Collection of works of I scientific-practical conference of post-graduate students, teachers, scientists, 2016, pp. 95-105. (In Russ.)
10. Dzhambekov A.M. [Fuzzy control system for the catalytic reforming process], *Prikaspijskij zhurnal: upravlenie i vysokie tehnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2015, no. 4, pp. 268-280. (In Russ.)
11. Vasil'eva N.V. [Construction of the functions of the parameters of the technological process on the basis of fuzzy clustering of production data], *Zapiski Gornogo instituta* [Notes of the Mining Institute], 2013, vol. 202, pp. 251-253. (In Russ.)
12. Vorobovich N.P. [Application of the optimal control theory for solving the multicriteria network planning problem with fuzzy resource constraints], *Vestnik Krasnojarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Krasnoyarsk State Agrarian University], 2009, no. 8, pp. 15-18. (In Russ.)
13. Shumihin A.G., Vjalyh I.A. [Classification of technological parameters of the catalytic cracking process in a fuzzy medium], *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Himicheskaja tehnologija i biotehnologija* [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Chemical technology and biotechnology], 2009, vol. 10, pp. 121-127. (In Russ.)

14. Dzhambekov A.M. [Use of information technologies to provide automated control of the catalytic reforming process under uncertainty], *Prikaspijskij zhurnal: upravlenie i vysokie tehnologii* [Pre-Caspian Journal: Management and High Technologies], 2017, no. 2(38), pp. 36-46. (In Russ.)

15. Shumihin A.G., Vjalyh I.A. [Formation of membership functions for the algorithm of fuzzy control of the technological process of catalytic cracking], *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [News of Tomsk Polytechnic University. Engineering georesources], 2010, vol. 316, no. 5, pp. 132-136. (In Russ.)

16. Romanova I.K. [Application of analytical methods to the study of Pareto - optimal control systems], *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.Je. Baumana* [Science and Education: a scientific publication of the Bauman Moscow State Technical University], 2014, no. 4, pp. 238-266. (In Russ.)

Optimale Prozesssteuerung des katalytischen Reformverfahrens der Benzinfraktionen

Zusammenfassung: Es ist die Aufgabenstellung der optimalen Steuerung des katalytischen Reformierungsprozesses erfüllt. Ein hybrides mathematisches Modell des katalytischen Reformierungsprozesses ist entwickelt. Eine multikriterielle Auswahl des Systems der Regulierung der Temperatur am Ausgang aus dem Ofen ist durchgeführt. Der Algorithmus zum Bestimmen der Einstellungen des Temperaturreglers am Ausgang aus dem Ofen in verschiedenen Modi des katalytischen Reformierungsprozesses ist synthetisiert. Die Methodik der optimalen Steuerung des katalytischen Reformierungsprozesses ist entwickelt. Die Suche nach Pareto-optimalen Lösungen der Steuerung des katalytischen Reformierungsprozesses ist durchgeführt. Positive Effekte sind mit dem entwickelten System der optimalen Kontrolle des katalytischen Reformierungsprozesses erzielt worden: die Senkung der durchschnittlichen Kosten um 0,33 Millionen Rubel; Erhöhung der durchschnittlichen Oktanzahl um 0,53; die Abnahme des Durchschnittswerts des verallgemeinerten Optimalitätskriteriums um 0,025.

Commande optimale du processus de reformage catalytique des fraction du pétrole

Résumé: Est réalisée la mise du problème la commande optimale du processus de reformage catalytique. Est élaboré le modèle mathématique hybride du processus de reformage catalytique. Est réalisé le choix à multiples critères d'un système de la régulation de la température à la sortie du four. Est synthésé l'algorithme de la définitions des paramètres du régulateur de la température à la sortie du four dans de différent modes du processus de reformage catalytique. Est élaborée la méthodologie pour la commande optimale du processus de reformage catalytique. Est effectuée la recherche de Pareto-solutions optimales lors de la commande optimale du processus de reformage catalytique. Sont obtenus des résultats positifs lors de l'utilisation d'un système optimal de commande des processus de reformage catalytique: réduction du coût moyen de 0,33 millions de roubles; augmentation de la moyenne de l'indice d'octane à 0,53; diminution de la valeur moyenne d'une synthèse du critère d'optimalité à 0,025.

Авторы: *Джамбеков Азамат Матифулаевич* – аспирант кафедры «Автоматика и управление»; *Щербатов Иван Анатольевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и управление», ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», г. Астрахань, Россия.

Рецензент: *Попов Георгий Александрович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационная безопасность», ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», г. Астрахань, Россия.