МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК

Издатель ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»

Применение метода управления на основе прогнозирующих моделей в процессах каталитического крекинга нефти

Аспирант, кафедра «Системы автоматического управления»: Б.А.Пашаева

Научный руководитель: А.И.Гаврилов, к.т.н., доцент кафедры «Системы автоматического управления»

УДК 681.51

МГТУ им. Н.Э. Баумана iu1@bmstu.ru

Одним из современных формализованных подходов к анализу и синтезу систем управления, базирующихся на математических методах оптимизации, является технология управления динамическими объектами с использованием прогнозирующих моделей (УПМ)[1].

В настоящее время сфера практического применения УПМ-методов существенно расширилась, охватывая разнообразные технологические процессы в химической и строительной индустрии, легкой и пищевой промышленности, в аэрокосмических исследованиях, в современных системах энергетики. МетодУПМ наиболее эффективен в системах управления процессами переработки нефти.

Основной задачей исследования является разработка системы управления на основе прогнозирующей модели для промышленного процесса каталитического крекинга нефти [2,7].



Рис.1. Установка каталитического крекинга

Установка каталитического крекинга нефти (ККН) состоит из двух основных частей: из реактора и регенератора (рис.1). Центральной частью установки

каталитического крекинга является реактор, функционирующий следующим образом: сырье проходит через нагреватель, смешивается с катализатором и поступает в вертикальную трубу (райзер), ведущую в нижнюю часть большого сосуда (отстойник). Время пребывания сырья в реакторе — несколько секунд, реакция протекает мгновенно. Основной задачей реактора является отделение углеводородов от катализатора. Это происходит в отстойной зоне реактора. Паровая фаза (прореагировавшее сырье) поднимается вверх и проходя через циклоны направляется в ректификационную колонну для дальнейшей очистки и обработки. Твердая фаза (закоксованный катализатор) за счет разности статических напоров катализатора в реакторе и регенераторе самотеком по наклонной транспортной линии поступает в регенератор.

Часть углеводородов, которая во время крекинга превращается в кокс, оседает в виде отложений на катализаторе. Когда поверхность катализатора покрывается отложениями, катализатор становится неактивным (отработанным). Чтобы удалить эти углеродные отложения, отработанный катализатор подают в регенератор, где его смешивают с горячим воздухом. В результате происходит окисление кокса. Процесс, протекающий в регенераторе, называют выжигом кокса.

Восстановленный катализатор выходит из нижней части регенератора. Его можно снова смешать с сырьем и направить в реактор. Таким образом, катализатор находится в непрерывном движении, проходя по циклу крекинг—регенерация.



Рис.2.Субпроцессы ККН

Для моделирования процесс ККН представленв виде относительно простыхсубпроцессов[3,4].Представление ККН в виде под-процессов приведена на рис.4. Процесс ККН представлен в виде 4-х субпроцессов: процессы узла ввода сырья, процессы прямоточного реактора, процессы зоны разделения реактора и процессы регенератора. Модель получена путем составления тепловых, материальных и кинетических балансов для каждогосубпроцесса.

Для узла ввода сырья математическая модель будет иметь вид:

$$T_{y_{3en}} = \frac{Q_{\kappa am1} * c_{p.\kappa am} * T_{pec} + Q_{cupbe} * c_{p.cupbe} * T_{cupbe} - \Delta H_{nap} * Q_{cupbe}}{Q_{\kappa am1} * c_{p.\kappa am} + Q_{cupbe} * c_{p.cupbe}},$$

где $T_{y_{3en}}$ - температура в узле ввода сырья, $Q_{\kappa aml}$ -расход восстановленного катализатора, $c_{p.cыpbe}$ - удельная теплоемкость сырья относительно компонента A, $Q_{cыpbe}$ - расход сырья, $T_{cыpbe}$ - температура сырья, ΔH_{nap} - энтальпия испарения сырья, $c_{p.\kappa.\kappa}$ - удельная теплоемкость катализатора, T_{nee} - температура в ренегераторе.

Процессы в реакторе каталитического крекинга сопровождаются рядом одновременно протекающих химических реакций. Согласно редуцированной модели реактора [5,6], эти реакции можно разделить на три вида:

Реакция 1: $A \xrightarrow{k_1} B$ Реакция 2: $B \xrightarrow{k_2} C$ Реакция 3: $A \xrightarrow{k_3} C$

где А – это сырье (гидроочищенный вакуумный дистиллят, иначе газойль), В – целевой продукт (бензин), С –легкие газовые фракции. Первая реакция желаемая, так как бензин является целевым продуктом. Реакции 2 и 3 являются побочными, следовательно, нежелательными реакциями.

$$\begin{cases} \frac{dY_A}{dz} = -\frac{1}{U_v}(k_1 + k_3)Y_A^2 \\ \frac{dY_B}{dz} = \frac{1}{U_v}(k_1 \cdot Y_A^2 - k_2 \cdot Y_B) \\ \frac{dY_C}{dz} = \frac{1}{U_v}(k_2 \cdot Y_B + k_3 \cdot Y_A^2) \\ \frac{dT_p}{dz} = -\frac{dY_A}{dz} \cdot \frac{(-\Delta H_{rl})}{(Y_A \cdot c_{p,A} + R_{\kappa am} \cdot c_{p,\kappa,\kappa})} \end{cases}$$

где Y_A - массовая доля сырья в прямоточном реакторе, Y_B - массовая доля бензина в прямоточном реакторе, Y_C -массовая доля кокса в прямоточном реакторе, k_1 , k_2 , k_3 - константы скорости реакций 1, 2, 3 соответственно, z – координаты прямоточного реактора, T_p - температура в прямоточном реакторе, ΔH_{rl} - энтальпия первой реакции, U_v - скорость прохождения пара через прямоточный реактор, $c_{p,A}$ - удельная теплоемкость сырья, R_{kam} - соотношение катализатор/сырье.

Закон сохранения массыприменительно ккоксуосажденному накатализаторе имеет вид:

$$M_{s} \cdot \frac{dC_{\kappa \kappa \kappa c2}}{dt} = Q_{\kappa a m 2} \cdot C_{\kappa \kappa \kappa c1} - Q_{\kappa a m 2} \cdot C_{\kappa \kappa \kappa c 2}$$

где M_s - масса катализатора в прямоточном реакторе, $C_{\kappa \sigma \kappa c 2}$ - массовая доля кокса на катализаторе в зоне разделения, $C_{\kappa \sigma \kappa c 1}$ - массовая доля кокса на катализаторе на выходе из прямоточного реактора, $Q_{\kappa am 2}$ - расход использованного катализатора.

Закон сохранения энергии для зоны десорбции описывается следующимдифференциальным уравнением:

$$M_s \cdot c_{p.cat} \cdot \frac{dT_s}{dt} = Q_{\kappa am2} \cdot c_{p.cat} \cdot T_r - Q_{\kappa am2} \cdot c_{p.cat} \cdot T_s$$

где *T*_s - температура в зоне десорбции.

Регенератор условно считается реактором идеального смешения, следовательно, модель будет с сосредоточенными параметрами. Химическая реакция горениякокса является центральнымэлементомматематической модели и записывается в виде двух дифференциальныхуравнений: уравнение материального баланса по коксу и уравнениематериального баланса по кислороду [10]:

$$W_{\kappa am.per} \cdot \frac{dC_{\kappa o \kappa c3}}{dt} = Q_{\kappa am2} \cdot C_{\kappa o \kappa c2} - Q_{\kappa am1} \cdot C_{\kappa o \kappa c3} - R_{cb}$$
$$W_{6030,per} \cdot \frac{dO_{per}}{dt} = \frac{Q_{6030yx}}{28.9} \cdot \left(0.2136 - O_{per}\right) - \frac{R_{cb} \cdot (1 + 1.5 \cdot \sigma)}{14 \cdot (1 + \sigma)}$$

где, $W_{\kappa am.pee}$ - молярная масса воздуха в регенераторе, $C_{\kappa o \kappa c^3}$ - массовая доля кокса в восстановленном катализаторе, R_{cb} - скорость выжига кокса, O_{pee} - молярная масса кислорода, поступающего в регенератор, Q_{so3dyx} - расход воздуха, σ - соотношение CO_2/CO .

Теплового баланса связанный с регенератором будет иметь вид:

$$W_{\kappa am.per} \cdot \frac{dT_{per}}{dt} = Q_{\kappa am2} \cdot (T_p + 273) + (T_{603dyx} + 273) \cdot Q_{603dyx} \cdot \frac{c_{p.803dyx}}{c_{p.\kappa am}} - \left(Q_{\kappa am1} + Q_{603dyx} \cdot \frac{c_{p.803dyx}}{c_{p.\kappa am}}\right) \cdot (T_{per} + 273) - \left(\Delta H_{CO} + \frac{\sigma}{1 + \sigma} \cdot \Delta H_{CO_2}\right) \cdot \frac{R_{cb}}{14 \cdot c_{p.\kappa am}}$$

где, T_{air} - температура воздуха, ΔH_{CO} - энтальпия реакции формирования CO, ΔH_{CO_2} - энтальпия реакции формирования CO_2

Моделирование системы проводилось в среде Matlab/SIMULINK (продукт компанииMathworks). Модель объекта состоит из двух основных модулей: реактор и регенератор.

При моделировании использовалось представление системы в переменных входвыход - в виде передаточных функций. Для построения адекватной динамической модели процесса каталитического крекинга проводится идентификация модели[7].

Предложенный метод идентификации состоит из трех основных этапов.

Первый шаг заключается в составлении структурной схемы процесса, которая приведена на рис.3.



Рис.3. Структурная схема процесса каталитического крекинга нефти

Н - передаточные функции реактора; G - передаточные функции регенератора, F – передаточные функции установки ККН.

Второй шаг заключается в определении вида передаточной функции для каждого канала связи. В этой работе, условно принимаем, что каждый канал связи может быть охарактеризован апериодическим звеном первого порядка без чистого запаздывания:

$$W(s) = \frac{k_m}{T_s * s + 1}$$

где k_m -коэффициент усиления; T_s - постоянная времени.

Передаточные функции реактора и регенератора были определены для статического режима, а передаточная функция всего процесса определена аналитическим путем.

Последний шаг процесса идентификации заключается в определении параметров передаточной функции для каждого канала, которые корректно будут отражать поведение процессов. Метод определения параметров передаточных функций описан в [7].

Моделирование системы управления производилось для различных значений управляющих параметров (температуры в реакторе и регенераторе) и возмущенийпри различных настройках MPC-регулятора.

В первом эксперименте поведение системы исследуется при скачкообразном изменении температуры реактора. На рис.4 представлены переходные процессы для температур реактора и регенератора, а на рис.5 графики изменения регулирующих параметров (подача катализатора в реактор и подача воздуха в регенератор) при скачкообразном изменении температуры в реакторе. Из графиков видно, что многосвязный регулятор по оценке с прогнозом обеспечивает достаточную точность и быстродействие. Система отслеживаетуставки без перерегулирования и с нулевой установившейся ошибкой.



Рис.4. Реакция выходных параметров системы на скачкообразное изменение температуры в реакторе



Рис.5. Изменение входных параметров системы при изменении уставки температуры в реакторе

Во втором эксперименте исследуется реакция системы на изменения возмущающего параметра – температуры сырья. Из рис.6 видно, что предложенная система управления хорошо компенсирует возмущения, возникающие в процессе работы.



Рис.6. Реакция выходных параметров системы на скачкообразное изменение температуры сырья.



Рис.7. Изменение входных параметров системы на скачкообразное изменение температуры сырья.

Основные результаты исследования:

-Рассмотрены особенности функционирования системы каталитического крекинга нефти.

-На основе исследований физико-химических свойств процесса разработана математическая модель ККН.

-Получена эффективная динамическая модель процесса ККН.

-Синтезирована система управления для каталитического крекинга нефти.

-Разработанная система управления с использованием прогнозирующих моделей демонстрирует удовлетворительные показатели качества процесса.

-Система управления нечувствительна к возмущениям, возникающим во время протекания процесса.

Литература

- 1. Bequette W., Process Control Modeling Design an Simulation, Prentice Hall, 2003, p. 564.
- D.M. Prett and R.D. Gillette.Optimization and constrained multivariable control of a catalytic cracking unit.In Proceedings of the Joint Automatic Control Conference, 1980, p. 43.
- 3. Гаврилов А.И., Пашаева Б.А. Интеллектуальная система управления каталитическим крекингом нефти//Интеллектуальные системы: Труды девятого международного симпозиума/ Под ред. К.А.Пупков 2010. С. 637-641.