

УДК 681.5

Л.Г. Тугашова*

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЫ В СРЕДЕ MATLAB

Определена последовательность получения статической и динамической модели ректификационной колонны. Приведены результаты расчета в Matlab. Рассмотрены подходы по улучшению управления процессом, в том числе настройка коэффициентов регуляторов с помощью генетического алгоритма.

Ключевые слова: колонна ректификации, управление, настройка регулятора.

Объектом исследования выбрана ректификационная колонна установки первичной переработки нефти. Сырьем является отбензиненная нефть. С верха колонны уходит бензиновая фракция, боковые отборы – дизельное топливо и газойль, кубовый продукт – мазут.

Первым этапом является получение статической модели объекта. В данном случае приведен расчет по секциям колонны. Он состоит из нижеперечисленных шагов.

1. Находим профиль давления по высоте колонны по формуле:

$$P_i = P_1 - i(P_1 - P_{NT}) / NT, \quad (1)$$

где P_1 – давление на первой тарелке; P_{NT} – давление на последней тарелке; $i = \overline{1, NT}$ – число тарелок.

2. Определяем количество перегретого водяного пара (ПВП) по тарелкам. Он поступает в основную и отпарную колонны, под тарелку отбора газойля:

$$\begin{aligned} Z_1 : Z_7 &= Z_{AK}; \\ Z_8 : Z_{14} &= Z_{S3} + Z_{AK}; \\ Z_{15} : Z_{23} &= Z_{OK} + Z_{S3} + Z_{AK}, \end{aligned} \quad (2)$$

где Z_{AK}, Z_{OK}, Z_{S3} – количество ПВП, подаваемого соответственно в атмосферную колонну, отпарную колонну, на тарелку отбора газойля, кг.

3. Составляем тепловой баланс колонны [1]:

$$\begin{aligned} e \cdot F \cdot h_{Tf}^V + (1-e) \cdot F \cdot h_{Tf}^L + (Z_{AK} + Z_{OK} + Z_{S3}) \cdot h_{360}^z = \\ = LS1 \cdot h_{T23}^L + LS2 \cdot h_{T13}^L + LS3 \cdot h_{T8}^L + LS4 \cdot h_{T1}^L + (Z_{AK} + Z_{OK} + Z_{S3}) \cdot h_{T23}^z, \end{aligned} \quad (3)$$

где e – доля отгона сырья; F – количество сырья, кг; h_{Tf}^V – энтальпия пара сырья, кДж/кг; h_{Tf}^L – энтальпия жидкости сырья, кДж/кг; $LS1, LS2, LS3, LS4$ – количество боковых отборов бензиновой фракции, дизельной фракции, газойля, мазута, кг; $h_{T23}^L, h_{T13}^L, h_{T8}^L, h_{T1}^L$ – энтальпия жидкой фа-

© Тугашова Л.Г., 2016.

DOI: 10.15350/2221-9552.2015.8-9

*Тугашова Лариса Геннадьевна – старший преподаватель кафедры автоматизации и информационных технологий, Альметьевский государственный нефтяной институт, Россия.

зынефтяных фракций при температуре T23, T13, T8, T1, кДж/кг; h_{360}^z, h_{T23}^z – энтальпия ПВП при температуре 360 °С и T23, кДж/кг.

4. Приход тепла (левая часть выражения (3)) обозначим через $Q1$, расход тепла (правая часть выражения (3)) обозначим через $Q2$. Находим разность dQ :

$$dQ = Q1 - Q2. \quad (4)$$

Количество тепла dQ распределяется между одним верхним и двумя циркуляционными орошениями.

5. Находим верхнее орошение из уравнения:

$$Q_{LT} = LT \cdot (h_{T23}^V - h_{TLT}^L), \quad (5)$$

где Q_{LT} – количество тепла верхнего орошения, кДж; LT – количество циркуляционного орошения, кг; h_{T23}^V, h_{TLT}^L – энтальпия верхнего орошения при температуре верха T23 и входа TLT, кДж/кг.

6. Определяем количество тепла каждого циркуляционного орошения (ЦО) по формуле:

$$Q_{LC1} = Q_{LC2} = (dQ - Q_{LT}) / 2. \quad (6)$$

7. Находим расходы первого и второго ЦО делением количества тепла на разность энтальпий.

$$Q_{LC1} = LC1 \cdot (h_{T8}^L - h_{TLC1}^L), \quad (7a)$$

где Q_{LC1} – количество тепла первого ЦО, кДж; $LC1$ – количество первого ЦО, кг; h_{T8}^L, h_{TLC1}^L – энтальпия первого ЦО при температуре выхода T8 и входа TLC1, кДж/кг.

$$Q_{LC2} = LC2 \cdot (h_{T13}^L - h_{TLC2}^L), \quad (7b)$$

где Q_{LC2} – количество тепла второго ЦО, кДж; $LC2$ – количество второго ЦО, кг; h_{T13}^L, h_{TLC2}^L – энтальпия второго ЦО при температуре выхода T13 и входа TLC2, кДж/кг.

8. Из балансов для секций бензина, дизельного топлива и газойля определяем расходы верхнего орошения и внутреннего орошения (флегмы), уходящих с тарелок 8 и 13.

Балансы для бензиновой секции:

$$V_{23} = LS1 + LT + Z_{23};$$

$$V_{12} = LS1 + LS2 + Z_{12};$$

$$\begin{aligned} LS1 \cdot h_{T12}^V + LS2 \cdot h_{T12}^V + Z_{12} \cdot h_{T12}^z + Z_{OK} \cdot h_{360}^z = \\ = LS1 \cdot h_{T23}^V + LS2 \cdot h_{T13}^L + Z_{23} \cdot h_{T23}^z + Q_{LT}. \end{aligned}$$

Балансы для секции дизельного топлива (от 12-й до 23-й тарелки):

$$V_{12} = LS1 + LS2 + LI_{13} + Z_{12};$$

$$V_{23} = LS1 + LT + Z_{23};$$

$$\begin{aligned} LS1 \cdot h_{T12}^V + LS2 \cdot h_{T12}^V + Z_{12} \cdot h_{T12}^z + Z_{OK} \cdot h_{360}^z + LI_{13} \cdot (h_{T12}^V - h_{T13}^L) = \\ = LS1 \cdot h_{T23}^V + LS2 \cdot h_{T13}^L + Z_{23} \cdot h_{T23}^z + Q_{LT} + LC2 \cdot (h_{T13}^L - h_{TLC2}^L). \end{aligned}$$

Балансы для секции газойлевой фракции (от 6-й до 12-й тарелки):

$$V_{12} = LS1 + LS2 + Z_{12} + LI_{13};$$

$$V_7 = LS1 + LS2 + LS3 + Z_7 - LI_8;$$

$$\begin{aligned} LS1 \cdot h_{T7}^V + LS2 \cdot h_{T7}^V + LS3 \cdot h_{T7}^V + Z_6 \cdot h_{T7}^z + Z_{S3} \cdot h_{360}^z + Z_{OK} \cdot h_{360}^z + LI_7 \cdot (h_{T7}^V - h_{T8}^L) = \\ = LS3 \cdot h_{T8}^L + LS2 \cdot h_{T13}^L + LS1 \cdot h_{T23}^V + Z_{23} \cdot h_{T23}^z + Q_{LT} + LC1 \cdot h_{T8}^L + LC2 \cdot (h_{T13}^L - h_{TLC2}^L). \end{aligned}$$

9. Находим расход флегмы, поступающей в отпарную секцию. Задаем паровое число. Определим количество углеводородных паров, возвращающихся в основную колонну.

Запишем баланс для отпарной секции:

$$(LS2 + LR) \cdot h_{TL13}^L + Z_{OK} \cdot (h_{360}^z - h_{TR}^z) = LR \cdot h_{TR}^V + LS2 \cdot h_{T13}^L.$$

10. Находим температуру бензиновой фракции на выходе из аппарата воздушного охлаждения (АВО).

Температура конденсации ПВП ($^{\circ}\text{C}$) определяется формулой:

$$TK = \frac{1}{0,00397 - 0,0004455 \cdot \lg(P_{ПВП})} - 273.$$

Рассчитывается тепловая нагрузка АВО:

$$Q_{ABO} = LS1 \cdot (h_{T23}^V - h_{TLT}^L) + Z \cdot (h_{T23}^z - h_{TLT}^z),$$

$$h_{T23}^z = 4,187 \cdot (606,5 + 0,305 \cdot TK + 0,5 \cdot (T23 - TK)).$$

Рассчитывается средняя разность температур ΔT_{cp} .

При $\Delta T_1 / \Delta T_2 > 2$

$$\Delta T_{cp} = \frac{(\Delta T_1 - \Delta T_2)}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}; Q_{ABO} = K_{ПП} \cdot F \cdot \Delta T_{cp}.$$

Определяем для бензиновой, дизельной и газойлевой фракций молярные доли в паровой фазе (рис. 1а) и парциальные давления. Сумма количества молей в паровой фазе по высоте колонны одинаковая. Расчет ведется в кг/100 кг сырья. Количество молей в сырье должно совпадать с количеством молей на тарелках (столбцы 12-15 в таблице 1, рис. 1б). Полученные результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1

Исходные данные

Количество нефтяных фракций, кг/100 кг сырья				Верхнее орошение, кг	Флегмовое число	Орошение с тар.-ки13, кг	Орошение с тар.-ки8, кг	ЦО2, кг	ЦО1, кг
Бензин	Дизель	Газойль	Мазут						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
17.9954	25.4778	6.7660	51.4210	21.5042	1.1950	22.4299	27.5145	24.3224	15.1092
16.5216	24.9082	6.7660	51.4210	20.8740	1.2634	22.2856	27.5145	24.8554	15.0537
16.5216	24.9082	6.7660	51.4210	17.8182	1.0785	16.2349	18.8278	26.1791	15.2549

Окончание таблицы 1

Флегма в отпарную колонну, кг	Сумма фракций в сырье, кмоль	Количество на тарелке отбора бензина, кмоль	Количество на тарелке отбора диз. топл., кмоль	Количество на тарелке отбора газойля, кмоль	Температура бенз. фр. на выходе АВО, $^{\circ}\text{C}$	Температуры на отборных тарелках, $^{\circ}\text{C}$			
						Мазут	Газойль	Дизель	Бензин
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
28.3623	0.4538	0.4538	0.4538	0.4538	39.5991	335.2377	308.1838	224.6516	136.7656
27.5530	0.4419	0.4419	0.4419	0.4419	37.1554	340.9536	312.6202	224.0947	135.9782
29.8899	0.4419	0.4419	0.4419	0.4419	41.5313	349.0961	319.4820	223.3046	136.3588

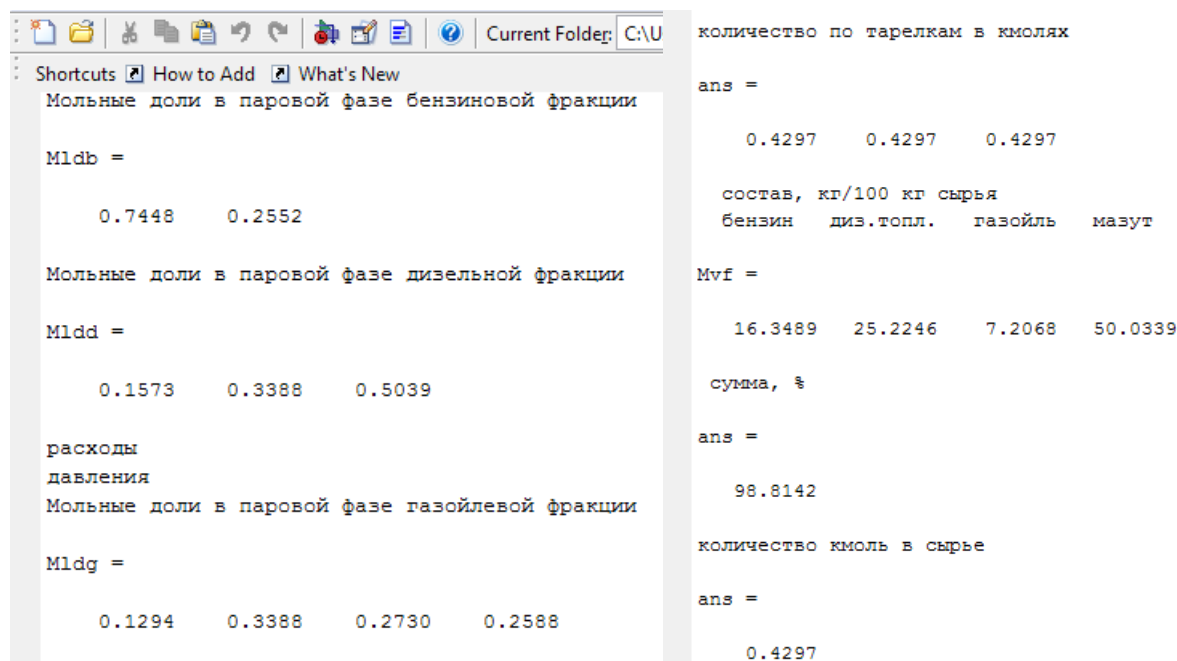


Рис. 1. Результаты расчета по секциям: а) мольные доли в паровой фазе для бензиновой, дизельной и газойлевой фракций; б) количество по тарелкам

Уравнения динамики по секциям записаны в следующем виде (для температур на тарелках 23, 13, 8):

$$\frac{dT_{23}}{dt} = (LS1 \cdot h_{T12}^V + LS2 \cdot h_{T12}^V + Z_{12} \cdot h_{T12}^z + Z_{OK} \cdot h_{360}^z - (LS1 \cdot h_{T23}^V + LS2 \cdot h_{T13}^L + Z_{23} \cdot h_{T23}^z + Q_{LT})) / (M_{23} \cdot c_{T23}). \quad (8)$$

$$\frac{dT_{13}}{dt} = LS1 \cdot h_{T12}^V + LS2 \cdot h_{T12}^V + Z_{12} \cdot h_{T12}^z + Z_{OK} \cdot h_{360}^z + LI_{13} \cdot (h_{T12}^V - h_{T13}^L) = (LS1 \cdot h_{T23}^V + LS2 \cdot h_{T13}^L + Z_{23} \cdot h_{T23}^z + Q_{LT} + LC2 \cdot (h_{T13}^L - h_{TLC2}^L)) / (M_{13} \cdot c_{T13}). \quad (9)$$

$$\frac{dT_8}{dt} = (LS1 \cdot h_{T7}^V + LS2 \cdot h_{T7}^V + LS3 \cdot h_{T7}^V + Z_6 \cdot h_{T7}^z + Z_{S3} \cdot h_{360}^z + Z_{OK} \cdot h_{360}^z + LI_7 \cdot (h_{T7}^V - h_{T8}^L) = LS3 \cdot h_{T8}^L + LS2 \cdot h_{T13}^L + LS1 \cdot h_{T23}^V + Z_{23} \cdot h_{T23}^z + Q_{LT} + LC1 \cdot h_{T8}^L + LC2 \cdot (h_{T13}^L - h_{TLC2}^L)) / (M_8 \cdot c_{T8}) \quad (10)$$

Теплоемкости жидкости на отборных тарелках c_T и количество жидкости на тарелках M принимаем постоянными, это является упрощением и полученные результаты принимаются в качестве начальных приближений для дальнейших расчетов. В дальнейшем выполнен подробный расчет динамической модели, который приведен в [2]. Система уравнений в этом случае состоит из уравнений общего материального баланса, покомпонентного материального баланса, парожидкостного равновесия, теплового баланса. Примеры полученных результатов приведены на рис. 2.

Для управления атмосферной колонной определены следующие основные параметры.

1. Управления: расход верхнего орошения, расход перегретого пара, отбор дизельного топлива.
2. Регулируемые параметры: температура верха (бензиновой фракции), температура дизельной фракции, температура куба (мазута).
3. Возмущения: расход сырья (отбензиненной нефти), температуры начала и конца кипения продуктовых фракций.

При практическом использовании модели необходимо учитывать несколько обстоятельств. Система должна реагировать на любые возмущающие воздействия, а не только на воздействия по основному каналу. Система должна не только стабилизировать параметр, но и изменить его в соответствии с заданием.

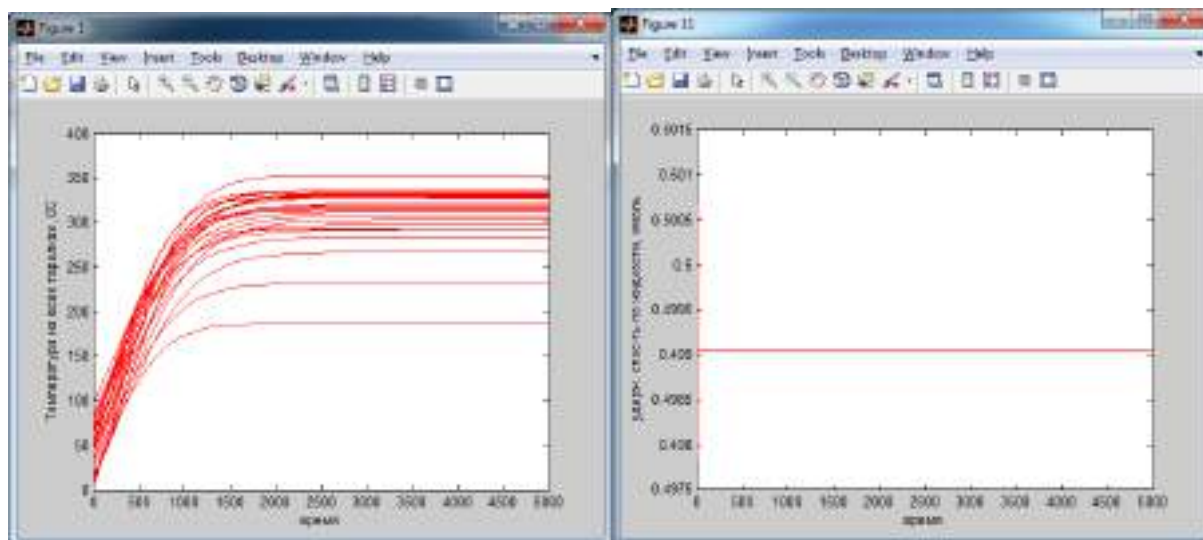


Рис. 2. Результаты моделирования в Matlab: а) температуры на тарелках;
б) удерживающая способность в сепараторе

Полученная нелинейная динамическая модель исследуемого объекта и САР реализованы в Simulink. Коэффициенты регуляторов могут быть подобраны для определенного состояния объекта, но при его переходе в другие состояния (изменение задания по температуре, возмущения) линейные регуляторы не обеспечивают необходимого качества переходного процесса.

Для усовершенствования управления применяются следующие подходы:

- управление по модели;
- построение блока настройки коэффициентов регулятора с помощью нечеткой логики, нейронных сетей, генетических алгоритмов;
- применение нечетких, нейронечетких регуляторов.

Для системы управления может быть решена задача параметрической оптимизации по различным критериям. Применяются интегральные критерии качества регулирования (квадратичный, модульный), и критерии, содержащие прямые показатели качества переходного процесса [3-6]. Например, в [6] предлагается использовать критерий качества, учитывающий запас устойчивости системы по методу Ротача, а также обобщенный критерий по прямым показателям качества (перерегулирование, время регулирования).

Рассмотрим применение блока настройки коэффициентов регуляторов с помощью генетического алгоритма (ГА). ГА используются для идентификации моделей объектов управления, для поиска оптимальных параметров регулятора (рис. 3), для поиска оптимальных положений функций принадлежности в фаззи-регуляторах и для обучения нейронных сетей.

В работе [7] генетические алгоритмы используются как для идентификации объекта управления, так и для настройки параметров ПИД-регулятора. Сначала составляется целевая функция, зависящая в первом случае от параметров объекта управления, во втором – от параметров ПИД регулятора K , T_d , T_i . Далее с помощью генетического алгоритма отыскивается глобальный минимум функции.

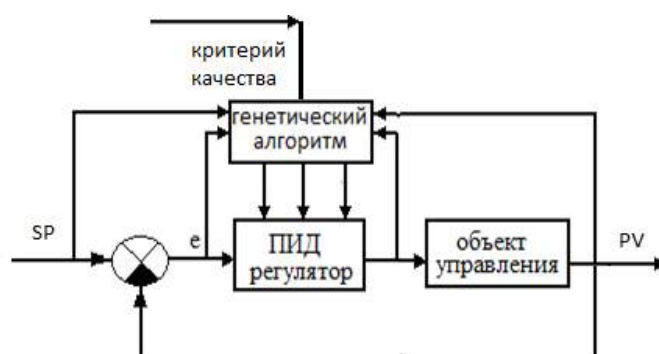


Рис. 3. Упрощенная схема настройки параметров регулятора

Преимуществом ГА является отсутствие значительных математических требований к видам целевых функций, ограничений и моделей объекта. Недостатком генетических алгоритмов является большое время поиска экстремума. Отличие генетических алгоритмов от традиционных методов поиска экстремума целевой функции состоит в том, что генетические алгоритмы обрабатывают не сами параметры задачи, а их закодированную форму. Используется только значений целевой функции, а не ее производных или иной дополнительной информации.

Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox (GADS) пакета *Matlab* содержит программы для решения задач оптимизации на основе использования двух методов: генетического алгоритма (*Genetic Algorithm*); метода прямого поиска (*Direct Search*). Если произошел останов просчета переходного процесса, той модели, которую использует ГА, необходимо ввести ограничение соответствующей координаты.

В *Matlab* реализован ПИД-регулятор с надстройкой в виде генетического алгоритма и *Simulink*-модель объекта. Определены коэффициенты ПИД-регулятора с использованием метода генетических алгоритмов в среде *Matlab*.

Использовался интегральный квадратичный критерий качества. Если при оптимизации ограничивать и входной сигнал, то получим формулу (11):

$$\varepsilon = \int_0^T (\eta((x(t) - x_s(t))_i^2 + \rho \cdot \Delta U(t)_i) dt, \quad (11)$$

где ΔU_i – изменение управления; η, ρ – коэффициенты пропорциональности.

С применением этого критерия получен апериодический процесс.

Таким образом, генетический алгоритм способен решать задачи оптимизации и настройки коэффициентов регуляторов по различным критериям при взаимосвязи параметров в системе, однако длительное время расчета является существенным недостатком.

Библиографический список

- [1] Скобло А.И., Молоканов Ю.К., Владимиров А.И., Щелкунов В.А. Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии. М.: ИЦ РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2012. 725 с.
- [2] Тугашова Л.Г. Динамическая модель процесса ректификации нефти // Нефтегазовый комплекс: образование, наука и производство: Мат. Всеросс. науч. конф. Альметьевск: АГНИ, 2016.
- [3] Денисова Л.А. Автоматизация синтеза нечеткой системы регулирования с использованием многокритериальной оптимизации и генетических алгоритмов // Автоматизация в промышленности. 2014. № 3. С. 54-62.
- [4] Затонский А.В. Программные средства глобальной оптимизации систем автоматического регулирования. М.: Издательский Центр РИОР, 2013. 136 с.
- [5] Еременко Ю.И., Полещенко Д.А., Глущенко А.И. Об оценке энергоэффективности применения нейросетевого оптимизатора в решении задач управления нагревательными объектами // ВСПУ-2014: Мат. XII Всеросс. совещания по проблемам управления. М., 2014.

- [6] Куцкий Н.Н., Лукьянов Н.Д. Синтез системы управления многосвязным объектом с помощью генетического алгоритма на примере прямоточного котла // Научный вестник НГТУ. 2014. №2 (54). С. 36-43.
- [7] Ereira D.S., Pinto J.O.P. Genetic algorithm based system identification and PID tuning for optimum adaptive control // IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. 2005. P. 801–806.

UDC 681.5

L.G. Tugashova

**SIMULATION OF THE CONTROL SYSTEM
IN THE ENVIRONMENT OF MATLAB DISTILLATION COLUMN**

Determined by the sequence of obtaining static and dynamic models of the distillation column. The calculation results are given in Matlab. Consider approaches for process control improvement, including setting the coefficients of the controller by using genetic algorithm.

Keywords: *distillation column, operation, setting of the regulator.*