

PREDICTIVE MODEL-BASED CONTROL SYSTEM DEVELOPMENT FOR A MULTI-COLUMN PLANT

¹Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

²Institute of automation and control process FEB RAS, Vladivostok, Russian Federation
samotylova@dvo.ru

In the refining and petrochemical industries, a large percentage of all plants are distillation units, which are key to achieving the required economic indicators. Control systems for multi-column distillation units must ensure optimal and reliable operation at a given product purity. The design of a good control system for such plants is very important to ensure reliable and high-quality operation of the whole process and is a challenging task due to the uncertainties associated with the complex process dynamics and the different composition of the feed stream affecting the separation behavior of the mixture. The paper summarizes the control structures developed based on predictive models to control the quality of the products produced. It is proposed to control the level in the tank of the partial condenser distillation column by (i) the distillate flow rate; (ii) the reflux flow rate, allowing the distillate flow rate to be used as a manipulated variable. The suitability of using control systems is determined based on steady-state controllability analysis and by studying the closed-loop dynamic characteristics (setpoint responses).

Key words: control system, predictive model, steady-state controllability analysis, multi-column unit, distillation

DOI 10.36807/1998-9849-2024-70-96--

Введение

Ректификационные колонны являются ключевыми элементами установок на нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводах. Они используются в технологических процессах: (i) первичной перегонки сырой нефти (атмосферная и вакуумная перегонка); (ii) стабилизации и перегонки бензина; (iii) получения высокооктановых присадок бензина; (iv) и других; и представляют собой совокупность сложных технологических систем, включающих несколько взаимосвязанных аппаратов, образующих многоуровневую систему управления (СУ) [1-3]. От разработанной СУ непосредственно зависит качество производимой продукции и эффективность производства. Разработка надежных СУ для ректификационных колонн вызывает большой интерес из-за их разнообразия, связанного со сложностью разделения, рабочих условий, ограничений колонн, экономических показателей и множества других. Использование различных типов ректификационных колонн требует разных структур управления.

Одним из наиболее интересных и сложных типов колонн является колонна с частичным конденсатором [4, 5]. Для ректификационных колонн с полным конденсатором давление обычно контролируется регулированием, теплоотвода конденсатора, так как скорость конденсации

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОКОЛОННОЙ УСТАНОВКОЙ НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗИРУЮЩИХ МОДЕЛЕЙ

¹Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Российская Федерация

²Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН, г. Владивосток, Российская Федерация
samotylova@dvo.ru

В промышленных отраслях нефтепереработки и нефтехимии большую часть объектов составляют ректификационные установки, которые являются ключевыми в достижении заданных экономических показателей. Системы управления многоколонными ректификационными объектами должны гарантировать оптимальную и надежную работу с заданной чистотой продукта. Разработка системы управления для таких установок очень важна для обеспечения надежной и качественной работы всего процесса и является сложной задачей из-за неопределенности, связанной со сложной динамикой процессов и различного состава подаваемого сырья, влияющего на поведение разделения смеси. Представлены разработанные структуры управления на основе прогнозирующих моделей по управлению качеством производимых продуктов. Уровень в емкости ректификационной колонны с парциальным конденсатором предлагается регулировать на основе (i) расхода дистиллята; (ii) расхода орошения, что позволило использовать расход дистиллята в качестве управляющей переменной. Пригодность использования систем управления определяется на основе анализа устойчивости и исследованиями динамических характеристик замкнутого контура.

Ключевые слова: ксистема управления, прогнозирующая модель, анализ устойчивости, многоколонная установка, ректификация

Дата поступления – 16 мая 2024 года

Дата принятия – 24 июня 2024 года

оказывает прямое влияние на давление. Регулирование потоков орошения или дистиллята не влияет на давление, поэтому взаимодействие между контурами управления давления и уровня жидкости в емкости отсутствует.

В ректификационной колонне с частичным конденсатором дистиллят удаляется из емкости в виде потока пара и жидкости. В таком случае на давление влияет не только теплоотвод конденсатора, но и расход парового дистиллята. Это приводит к взаимодействию между контурами управления. Например, в структуре управления, когда давление контролируется отводом тепла конденсатора, а уровень жидкости в емкости контролируется расходом орошения, при понижении температуры в колонне давление падает. Это приведет к уменьшению отвода тепла от конденсатора. Поэтому снизится количество конденсата, что приведет к снижению уровня жидкости в емкости. В свою очередь регулятор уровня жидкости в емкости уменьшит расход орошения, что приведет к повышению температуры.

Кроме СУ на эффективность управления оказывает и метод оптимального управления. В контроле производственных процессов одним из наиболее эффективных методов управления является управление с прогнозиру-

ющими моделями (Model Predictive Control – MPC) [6-8]. При проектировании систем управления кроме получения подходящей структуры управления необходимо определить и прогнозирующие модели, так как на качество управления будет напрямую влиять способность прогнозирующих моделей отражать динамику объекта.

В статье представлены разработанные системы управления на основе прогнозирующих моделей для управления качеством производимых продуктов многоколонной установки. Показаны варианты регулирования уровня в емкости ректификационной колонны с парциальным конденсатором с помощью (i) расхода дистиллята и (ii) расхода орошения. На основе анализа управляемости и исследований динамических характеристик замкнутого контура на основе стратегии MPC разработана эффективная система управления.

Объект исследования и структуры управления

В качестве объекта исследования рассматривается многоколонная установка стабилизации бензина. Установка включает две последовательно соединенные ректификационные колонны, первая из которых с частичным конденсатором. Рассмотрены два случая управления качеством продуктов: концентрацией углеводородов C₅ в углеводородном газе (УВГ) и концентрацией углеводородов C₁-C₄ во фракции 35-70 °С.

Структура управления 1. На рис. 1 показана структура управления, которая чаще используется на производстве для ректификационных колонн с частичными конденсаторами. Основными особенностями этой структуры являются: (i) давление, контролируемое регулированием расхода УВГ, и (ii) уровень жидкости в емкости, контролируемый расходом сжиженного газа. Температура верха колонны контролируется расходом орошения.

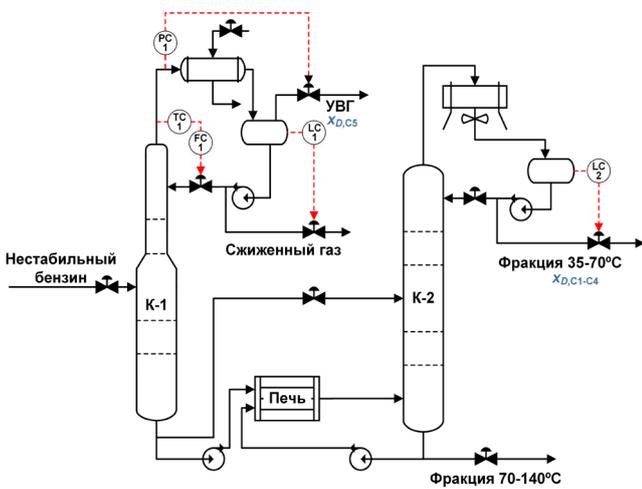


Рис. 1. Структура управления 1: уровень жидкости в емкости контролируется расходом сжиженного газа

Взаимодействие между контурами уровня и давления имеется, т.к. любое возмущение, влияющее на один контур, распространяется и на другой. Например, предположим, что состав сырья изменился и в колонну поступает больше C₅₊ углеводородов. Температура верха колонны упадет. При фиксированном расходе охлаждающей воды скорость конденсации уменьшится. Снижение конденсата приведет к снижению уровня жидкости в емкости и снижению давления при фиксированном выводе УВГ. В такой ситуации контроллер начнет снижать расход УВГ для повышения давления и регулировать расход охлаждающей воды таким образом, чтобы повысить уровень жидкости в емкости. Это взаимодействие может привести к конфликту между

контурами давления и уровня.

Одной из фундаментальных концепций управления ректификационными установками является предотвращение резких изменений давления, которые в результате приведут к резким изменениям расходов дистиллята и УВГ. В случае подачи выходных продуктов на последующую установку, такие изменения расходов могут привести к серьезным технологическим нарушениям.

Рассмотрим только подсистему управления, которая состоит из двух контролируемых переменных: концентраций C₅ в УВГ (x_{D,C5}) и C₁-C₄ во фракции 35-70 °С (x_{D,C1-C4}); и двух управляющих переменных: температуры верха колонны К-1 (ТС-1) и давления верха колонны К-1 (РС-1). Модель этой подсистемы имеет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} x_{D,C_5} \\ x_{D,C_1-C_4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1,32s + 0,08)e^{-0s} & -0,2e^{-6s} \\ 56,8s^2 + 15,1s + 1 & 9,4s + 1 \\ -0,28e^{-6s} & (0,22s + 0,7)e^{-0s} \\ 19,1s + 1 & 53s^2 + 15,8s + 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} TC-1 \\ PC-1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Передаточные функции для рассматриваемых подсистем управления получены экспериментальным путем. Для этого проводилось пошаговое тестирование управляющих переменных (размер шага составлял ±1% по сравнению с установившимся значением) и наблюдался отклик контролируемых переменных на эти изменения. Обработка полученных результатов осуществлялась с использованием программного обеспечения Profit Design Studio компании Honeywell.

Структура управления 2. На рис. 2 представлена альтернативная структура управления, в которой уровень жидкости в емкости, контролируется расходом орошения вместо расхода сжиженного газа.

Давление контролируется расходом потока пара (УВГ), поэтому структура имеет аналогичную трудность, связанную с резкими изменениями давления.

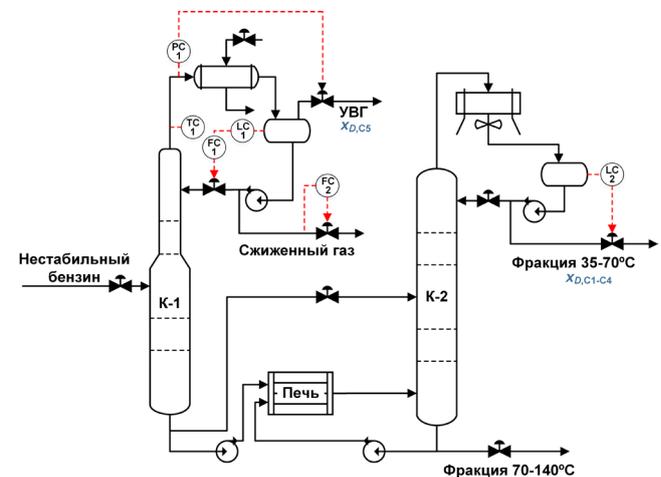


Рис. 2. Структура управления 2: уровень жидкости в емкости контролируется расходом орошения

В этой подсистеме две контролируемые переменные x_{D,C5} и x_{D,C1-C4} остаются прежними, а в качестве управляющих переменных используются: расход сжиженного газа (FC-2) и давление верха колонны К-1 (РС-1):

$$\begin{bmatrix} x_{D,C_5} \\ x_{D,C_1-C_4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,003e^{-0s} & -0,5e^{-6s} \\ 6s + 1 & 61,2s + 1 \\ -0,75e^{-6s} & 3,95e^{-6s} \\ 15s + 1 & 24,5s + 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} FC-2 \\ PC-1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Для управляющей переменной РС-1 передаточные

Структура управления 2. ?

функции скорректированы повторным проведением пошагового тестирования.

Одним из основных преимуществ такой структуры является то, что постоянный расход сжиженного газа обеспечивает постоянные скорости потоков из колонны К-1.

Анализ устойчивости систем управления

Для определения пригодности разработанных подсистем управления проведен анализ их устойчивости. Для этого использовали разработанную авторами программу для ЭВМ «Анализ устойчивости систем управления» [9], которая позволяет рассчитать массив относительного усиления (МОУ), отклонение диагональных элементов МОУ от единицы, индекс Нидерлинского (ИН), индекс устойчивости Морари (МИ) и число обусловленности (γ). Результаты представлены в таблице.

Таблица. Анализ управляемости исследуемого процесса в установившемся состоянии

№	Критерий	Структура управления	
		(1)	(2)
1	МОУ	$\begin{pmatrix} 29,7047 & -28,7047 \\ -28,7047 & 29,7047 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,0306 & 0,9694 \\ 0,9694 & 0,0306 \end{pmatrix}$
2	$\Delta_{\text{МОУ}}$	57,4093	1,9387
3	МИ	0,0025	0,0955
4	γ	317,8397	42,4089
5	НИ	0,0337	32,6456

Обычно элементы МОУ ≤ 1 . Значения МОУ $\geq 0,5$ обозначают прямое сопряжение контролируемых и управляющих переменных, в противном случае обратное взаимодействие [10]. Элементы первого варианта СУ значительно больше 1, что приводит к затруднениям управления объектом. Более того, отрицательные элементы свидетельствуют о необходимости избегать соответствующие взаимодействия.

Оба значения НИ положительны, поэтому обе структуры управления должны быть устойчивыми в замкнутом контуре. Однако большее значение МИ, полученное для СУ (2), свидетельствует о лучшей управляемости процесса. Таким образом, проведенный анализ управляемости исследуемого процесса в установившемся состоянии позволяет предположить, что использование второй структуры управления предпочтительнее для рассматриваемого технологического процесса.

Далее исследовались динамические характеристики с помощью МРС алгоритма [10]. Параметры настройки

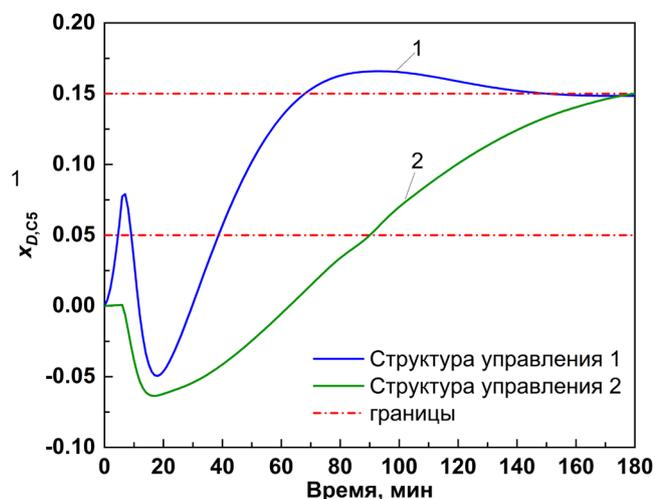


Рис. 3. Реакция системы при изменении заданного значения $X_{D,CS}$

МРС: горизонт прогнозирования $P = 20$, горизонт управления $M = 10$ и весовые коэффициенты для $X_{D,CS}$ и $X_{D,C1-C4}$ были определены равными 2 и 1.

На рис. 3 и 4 показаны динамические характеристики систем управления качеством выходных продуктов в замкнутом контуре.

Как показано на рис. 3 реакция системы при изменении заданного значения концентрации C_5 в УВГ является переменной с небольшим перерегулированием при использовании первой структуры управления. При использовании второй структуры управления, напротив, наблюдается плавная реакция, и она является предпочтительнее для управления.

На рис. 4 для структуры управления 1 по управлению концентрацией C_1-C_4 во фракции 35-70 °С наблюдается медленная реакция в сравнении со второй схемой управления, при которой общая постоянная времени процесса составляет 20 мин.

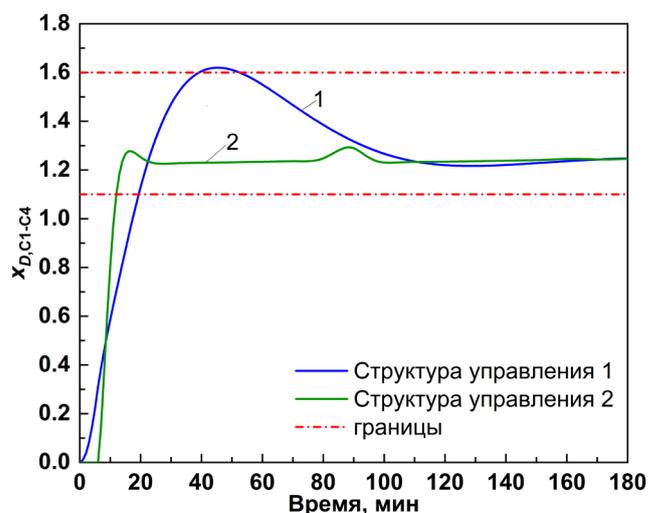


Рис. 4. Реакция системы при изменении заданного значения $X_{D,C1-C4}$

Представленные динамические результаты подтверждают ожидаемую производительность схем управления и указывают на то, что использование регулирования по первой схеме будет трудным и медленным.

Заключение

В статье продемонстрированы два варианта управления качеством выходных продуктов для многоколонной установки. Основное различие между ними заключается в регулировании уровня в емкости ректификационной колонной с парциальным конденсатором: с (i) расходом дистиллята и (ii) расходом орошения. Для представленных систем управления получены передаточные функции, описывающие связь между входами и выходами системы, на основе которых проведен анализ управляемости исследуемого процесса в установившемся состоянии и исследовались их динамические характеристики в замкнутом контуре. Полученные результаты показали эффективность использования второй структуры управления, в которой уровень жидкости в емкости ректификационной колонны с парциальным конденсатором, контролируется расходом орошения вместо расхода сжиженного газа. При такой структуре наблюдается плавное управление концентрацией углеводородов C_5 в выходящем из колонны УВГ и быстрое управление концентрацией C_1-C_4 во фракции 35-70 °С.

Благодарность

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИАПУ ДВО РАН (тема FFW-2021-0003).

Литература

1. *Kiss A.A.* Advanced distillation technologies: design, control and applications. John Wiley & Sons, 2013. 397 p. DOI 10.1002/9781118543702
2. *Kim C., Shah M., Sahlodin A.M.* Design of multi-loop control systems for distillation columns: review of past and recent mathematical tools // *Chemical Product and Process Modeling*. 2022. Vol. 17. N 2. Pp. 171-197. DOI 10.1515/cppm-2020-0070
3. *Luyben W.L.* Control of distillation columns with dual steam and hot-oil reboilers // *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*. 2022. Vol. 179. Pp. 109068. DOI 10.1016/j.cep.2022.109068
4. *Luyben W.L.* Design and control of distillation columns with inert venting // *Computers & Chemical Engineering*. 2020. Vol. 134. Pp. 106725. DOI 10.1016/j.compchemeng.2020.106725
5. *Patrascioiu C., Rahman N. A., Popescu M.* Optimal control system for products quality from a deethanizer column // *Computer Aided Chemical Engineering*. 2022. Vol. 51. Pp. 253-258. DOI 10.1016/B978-0-323-95879-0.50043-6
6. *Chen M., Xu Z., Zhao J.* Triple-mode model predictive control using future target information // *Processes*. 2020. Vol. 8. N 1. Pp. 54. DOI 10.3390/pr8010054
7. *Shin Y., Smith R., Hwang S.* Development of model predictive control system using an artificial neural network: a case study with a distillation column // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 277. Pp. 124124. DOI 10.1016/j.jclepro.2020.124124
8. *Yamashita A.S., Zanin A.C., Odloak D.* Tuning the model predictive control of a crude distillation unit // *ISA transactions*. 2016. Vol. 60. Pp. 178-190. DOI 10.1016/j.isatra.2015.10.017
9. *Шевлягина С.А., Стабров С.В.* Анализ устойчивости систем управления // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024615335, 05.03.2024. Заявка от 26.02.2024. (*Shevlyagina S.A., Stabrov S.V.* Analiz ustojchivosti sistem upravleniya // Svidetel'stvo o registracii programmy dlya EVM RU 2024615335, 05.03.2024. Zayavka ot 26.02.2024 *In Russian*)
10. *Seborg D.E., Edgar T.F., Mellichamp D.A., Doyle III F.J.* Process dynamics and control. John Wiley & Sons, 2016. 512 p.

Сведения об авторах

Стабров Сергей Владимирович, аспирант, Дальневосточный федеральный университет, старший инженер-программист, лаборатория систем управления технологическими процессами (№ 62), Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН; **Sergey V. Stabrov**, Ph.D. student, Far Eastern Federal University, senior programming engineer, laboratory of the process control systems (No. 62), Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, stabrov.sv@gmail.com

Шевлягина Светлана Александровна, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., лаборатория систем управления технологическими процессами (№ 62), Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, доцент, Дальневосточный федеральный университет; **Svetlana A. Shevlyagina**, Ph. D. (Eng.), senior researcher, laboratory of the process control systems (No. 62), Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Associate Professor, Far Eastern Federal University, samotylova@dvo.ru