

РАЗРАБОТКА КАСКАДНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ МНОГОПОТОЧНОЙ ТРУБЧАТОЙ ПЕЧЬЮ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ УСТАНОВКИ

К.С. Теслов

Омский государственный технический университет
Россия, 644050, Омск, пр. Мира, 11
E-mail: teslov.k@gmail.com

Е.С. Гебель

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
E-mail: gebel_es@spbstu.ru

Ключевые слова: многопоточная печь, многосвязные системы управления, математическая модель, ПИД-регулирование.

Аннотация: В статье представлено описание подхода к управлению многопоточной трубчатой печью нефтеперерабатывающей установки с учетом связности каналов регулирования расхода входных потоков нефтяной эмульсии. Предложенная каскадная схема управления решает проблему ручной коррекции уставок регуляторов расхода отдельных потоков с учетом имеющегося ограничения по загрузке аппарата. Математическая модель объекта управления представлена в виде передаточных функций, полученных в результате идентификации средствами пакета Matlab Simulink на основе экспериментальных данных кривых разгона технологических параметров, контролируемых в существующей АСУ ТП. Численные эксперименты на предложенной модели каскадного управления доказали эффективность предложенного подхода.

1. Введение

Современные тенденции в области систем управления все больше склоняются к интеллектуальным алгоритмам, основанным на обработке больших данных [1]. Этот тренд обусловлен увеличением вычислительных мощностей программируемых логических контроллеров, внедрением технологий и подходов парадигмы Индустрия 4.0., возросшими требованиями к производительности, качеству, энергоэффективности, надежности и безопасности производства [2]. Однако потенциал классических подходов теории автоматического регулирования к управлению технологическими аппаратами еще далеко не исчерпан, что подтверждается большим количеством научных публикаций российских и зарубежных авторов на эту тему [3-6].

В статье рассматривается участок технологического процесса получения бензиновой фракции, а именно, составляющая большинства нефтеперерабатывающих установок – многопоточная трубчатая печь (рис. 1), в которой осуществляется нагрев нефтяной эмульсии до температуры кипения на линии подачи исходного сырья на питающую тарелку ректификационной колонны. Температура на выходе подогревателя влияет на скорость разделения исходного сырья на фракции, таким образом, на

производительность работы не только колонны, но и всей установки в целом.

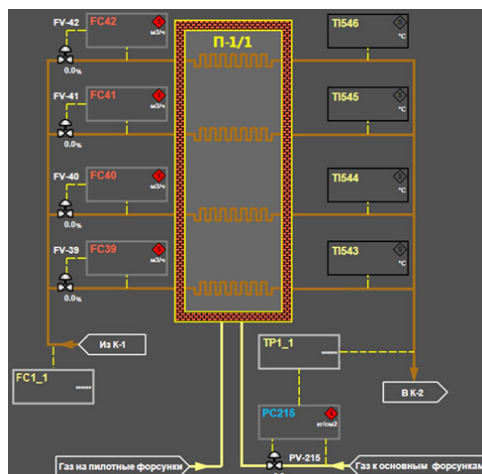


Рис.1. Мнемосхема автоматизации многопоточной печи: TP1_1 – результирующая температура выходного потока, TI543 ÷ TI546 – значения температур выходных потоков, FC39 ÷ FC42 – расходы нефтяной эмульсии нефти на каждом змеевике, FV_39÷FV_42 и PV_215 – регулирующие клапаны, FC1_1 – общий расход эмульсии в печь, PC215 – давление топливного газа.

Многопоточная трубчатая печь является сложным многомерным объектом управления, для которого характерны большое время запаздывания и значительная инерционность [7]. На практике синтез систем автоматического регулирования такими технологическими аппаратами выполняют либо принимая допущение об автономности каналов управления, в случае несущественного взаимного влияния [8-11], либо используя компенсаторы для устранения взаимной перекрестной зависимости входных и выходных переменных организуют дополнительные связи [12-16].

Реализованный на производстве вариант схемы управления многопоточной трубчатой печью предполагает регулирование результирующей температуры четырех потоков нефти на выходе печи путем коррекции давления топливного газа, при этом уставки на регуляторы расхода входных потоков вводятся оператором вручную с учетом заданной загрузки печи (рис. 1). Однако поглощение тепловой энергии, полученной в результате сжигания топливно-воздушной смеси, на каждом змеевике аппарата происходит неравномерно, что зависит не только от технического состояния и внутренней конструкции печи, но и от ряда других факторов, влияние которых оценить посредством прямых измерений в ряде случаев невозможно, либо экономически нецелесообразно. Кроме того, в ходе эксплуатации оборудования установлено, что значительное различие между температурами выходных потоков снижает КПД печи. Таким образом, актуальной является разработка системы автоматического стабилизации результирующей температуры выходного потока при условии равномерного температурного профиля на каждом из них и выполнении ограничения по общему расходу нефтяной эмульсии.

2. Имитационная модель объекта управления

Использование динамических моделей не выше второго порядка для непрерывных технологических процессов, таких как регулирование расхода, уровня или температуры, дает удовлетворительные для инженерной практики результаты [17, 18]. Параметры передаточных функций каналов регулирования с учетом их связности

(взаимного влияния входных переменных – расхода эмульсии на каждом змеевике $F1 \div F4$, на отклонение температур $DT1 \div DT4$ от заданного значения T_{sum}) определены на основе ретроспективных экспериментальных данных кривых разгона из существующей АСУ ТП путем идентификации встроенными инструментами программного пакета MATLAB Simulink (рис. 2).

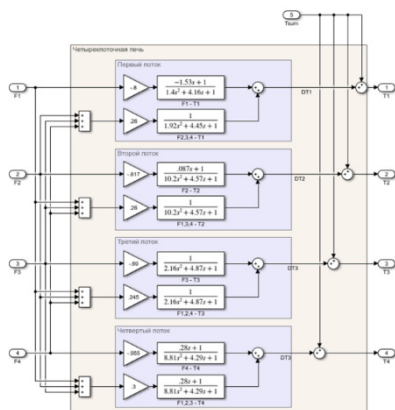


Рис.2. Имитационная модель многопоточной печи в среде MATLAB Simulink.

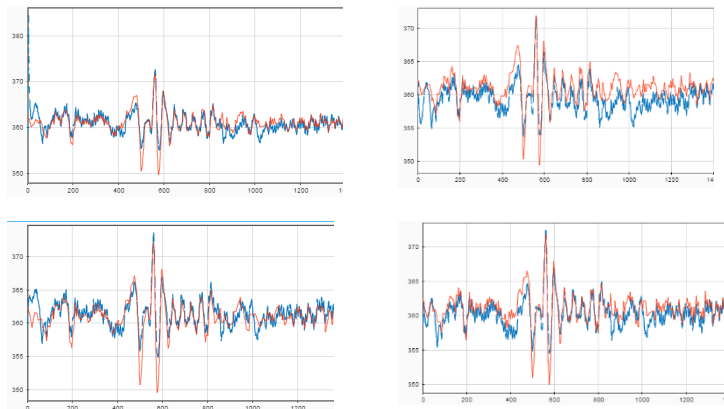


Рис. 3. Температурные тренды на первом, втором, третьем и четвертом змеевиках. Диаграммы, показанные красным цветом, получены из АСУ ТП, синим – на модели.

Верификация произведена путем сопоставления графиков изменения температур (рис. 3), построенных на основе расчетных данных из имитационной модели (рис. 2) и показаний соответствующих приборов $TI_{543} \div TI_{546}$ (рис. 1). В результате анализа установлено, что среднее значение исследуемого параметра, полученное аналитически и экспериментально различается менее, чем на 0,5 градуса, что позволяет сделать вывод об адекватности математической модели объекта управления.

3. Синтез системы автоматического регулирования

Канал регулирования общего (суммарного) расхода в рассматриваемой системе автоматического управления многопоточной печью является быстродействующим по сравнению с каналами регулирования выравнивания температур потоков, что позволяет строить системы регулирования расхода и температур потоков как независимые друг от друга системы. Предлагаемая двухконтурная система управления многопоточной печью стабилизирует температурный профиль выходных потоков и формирует уставки локальным регуляторам расходов входных потоков на змеевиках (рис. 4).

Физические ограничения по общей загрузки аппарата, а также влияние шумов в измерительных каналах учтены с помощью типовых нелинейных элементов «зона нечувствительности» и «насыщение» (рис. 4). Проблема интегрального насыщения в канале регулирования расхода решена путем коррекции сигнала с масштабным коэффициентом «0.5». Усилительные звенья на входе ПИ-регуляторов предназначены для отладки имитационной модели системы, так значение «-1» соответствует обратному направлению действия регулятора, «0» – отключению регулятора, а «1» – прямому действию регулятора. Контур регулирования давления топливного газа в печь формирует уставку по результирующей температуре с учетом требований технологического регламента. Настройка всех регуляторов модели (рис. 4) проводилась встроенными средствами пакета MATLAB Simulink из условия минимизации второго интегрального критерия оптимальности [19-21].

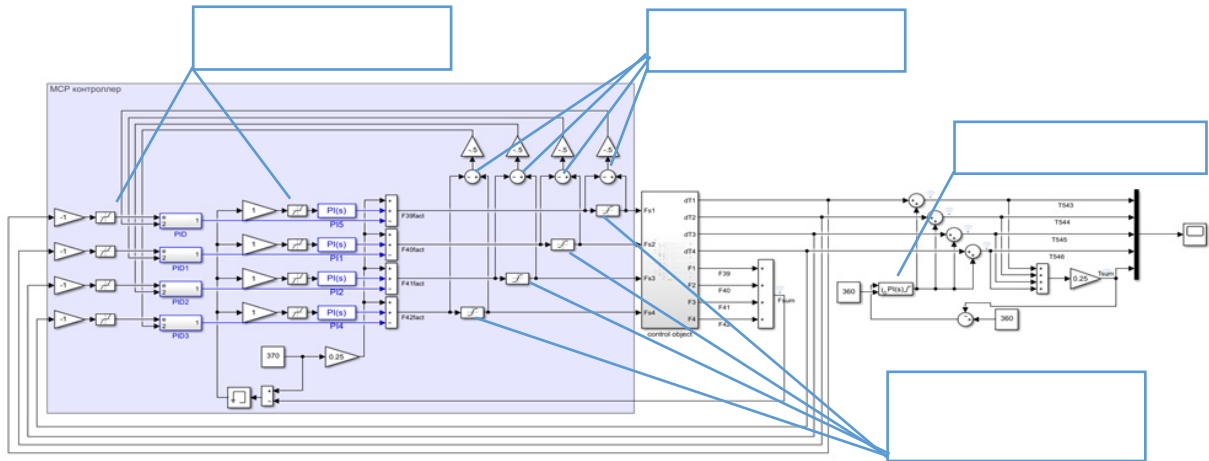


Рис. 4. Имитационная модель многосвязной системы управления многопоточной трубчатой печью.

Проверка функционирования регуляторов выравнивания температур выходных потоков для исследуемого объекта осуществлялась при их совместной работе, поскольку присутствуют контуры с положительной обратной связью (как добавочные возмущения от процессов в других потоках печи). Результаты модельных исследований разработанной каскадной системы автоматического управления многопоточной печью представлены на рис. 5. Графики переходных процессов, полученные при возмущении заданными расходами потоков на 240-й и 300-й секундах, демонстрируют хорошее качество управления (стабилизация температур наступает через 75 секунд, при этом отклонение не превышает 2°C). Изменение уставки по общему расходу исходного сырья ($F, \text{м}^3/\text{час}$) на 5%, возникающее на 450-й секунде, отрабатывается системой управления за 20 секунд. Из графиков следует, что поддержание заданного суммарного расхода осуществляется с высокой точностью.

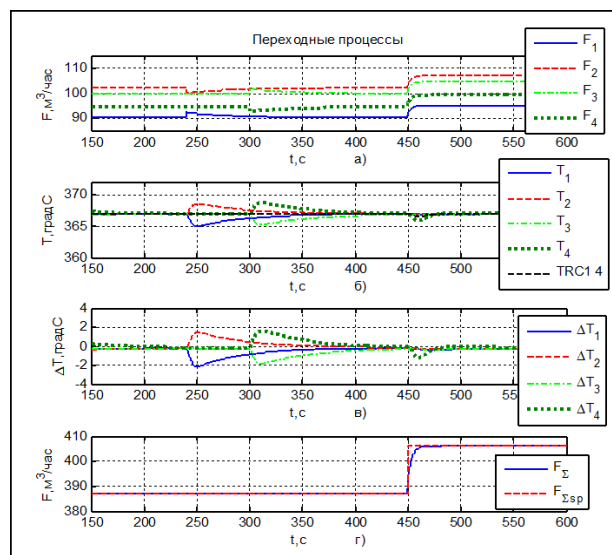


Рис. 5. Переходные процессы многопоточной печи с каскадной системой управления.

На основании проведенных вычислительных экспериментов сделан вывод, что каскадная система автоматического управления многопоточной трубчатой печью позволила достичь поставленные цели автоматизации.

4. Заключение

Внедрение предложенной системы автоматического управления многопоточной трубчатой печью нефтеперерабатывающей установки решит проблему ручной коррекции уставок расходов входных потоков на каждый змеевик, повысит КПД аппарата за счет выравнивания температурного профиля выходных потоков. Глобальная цель управления, а именно стабилизация результирующей температуры на выходе при условии заданной производительности, также достигнута.

Таким образом, в работе продемонстрирована эффективность классических подходов к построению систем автоматического регулирования сложными многомерными объектами со связными каналами управления. Дальнейшие исследования направлены на масштабирование системы управления многопоточными печами с произвольным количеством входных потоков, применение в структуре контроллера нечетких и нейронных регуляторов.

Список литературы

1. Халиулин Р.А. Цифровые двойники как инструмент мониторинга производственных процессов в индустрии 4.0 // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2023. Т. 25, № 2 (112). С. 45-50.
2. Дозорцев В.М. Цифровые двойники в промышленной автоматизации – на пике моды или наступившее будущее? // Автоматизация в промышленности. 2022. № 7. С. 3-14.
3. Кудряшов В.С., Тихомиров С.Г., Рязанцев С.В., Иванов А.В. и др. Метод моделирования многосвязной цифровой системы управления процессом синтеза аммиака // Вестник ТГТУ. 2017. № 4. С. 572-580.
4. Дяконича С.А., Сугачевский И.Р. Применение компенсирующего регулирования для многосвязного управления многопараметрической системой // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 1. С. 86-90.
5. Zhitckii L.S., Azarskov V.N., Solovchuk K.Y., Sushchenko O.A. Discrete-time robust steady-state control of nonlinear multivariable systems: a unified approach // IFAC Proceedings Volumes. 2014. Vol. 47, No. 3. P. 8140-8145.
6. Ram V.D., Chidambaram M. Simple method of designing centralized PI controllers for multivariable systems based on SSGM // ISA transactions. 2015. Vol. 56. P. 252-260.
7. Таушев В.В., Теляшев Э.Г., Таушева Е.В. Трубчатая печь с регулируемым профилем температуры по длине змеевика // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. 2012. № 3. С. 31-34.
8. Морозовский В.Т. Многосвязные системы автоматического регулирования. М.: Энергия, 1970. 288 с.
9. Биленко В.А. Анализ условий декомпозиции задачи настройки многосвязной автоматической системы регулирования технологического процесса // Автоматика и телемеханика. 1990. № 1. С. 145-158.
10. Luan X., Chen Q., Liu F. Centralized PI control for high dimensional multivariable systems based on equivalent transfer function // ISA transactions. 2014. Vol. 53, No. 5. P. 1554-1561.
11. Denisova L.A., Alekseitsev D.M. Developing a Supervisory Control System Based on Fuzzy Logical Inference // Automation and Remote Control. 2021. Vol. 82, No. 2. P. 324-332.
12. Соболев О.С. Методы исследования линейных многосвязных систем. М.: Энергоатомиздат, 1985. 121 с.
13. Ray W. Multivariable control: a survey // Computers & chem. 1985. No. 4. P. 367-394.
14. Куцый Н.Н., Лукьянов Н.Д. Синтез системы управления многосвязным объектом с помощью генетического алгоритма на примере прямоточного котла // Системы анализа и обработки данных. 2014. № 2 (55). С. 36-42.
15. Шишлаков В.Ф., Шишлаков Д.В. Параметрический синтез многосвязных систем автоматического управления обобщенным методом Галеркина // Информационно-управляющие системы. 2006. № 3. С. 51-55.
16. Chenliang W., Yan L. Adaptive dynamic surface control for linear multivariable systems // Automatica. 2010. Vol. 46, No. 10. P. 1703-1711.
17. Гудвин Г.К., Гребе С.Ф., Сальгадо М.Э. Проектирование систем управления. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. 911 с.

18. Денисова Л.А. Автоматизация параметрического синтеза системы регулирования на основе многокритериальной оптимизации с использованием генетического алгоритма // Автоматизация в промышленности. 2013. № 12. С. 7-14.
19. Bhat V.S., Thirunavukkarasu I., Priya S.S. Design of centralized robust PI controller for a multivariable process // Journal of Engineering Science and Technology. 2018. Vol. 13, No. 5. P. 1253-1273.
20. Смирнов Н.И., Сабанин В.Р., Репин А.И. К вопросу о чувствительности и робастной настройке многомерных регуляторов в системах связанного регулирования // Промышленные АСУ и контроллеры. 2007. № 7. С. 31-36.
21. Липа О.А. Выбор критериев качества управления при использовании односвязных и многосвязных систем управления технологическими процессами // Международный технико-экономический журнал. 2012. № 2. С. 68-70.