

Шаровина Светлана Олеговна

**АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫМ ПРОФИЛЕМ
РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЫ ТАРЕЛЬЧАТОГО ТИПА**

05.13.06 Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами (в энергетике)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре Автоматизированных систем управления тепловыми процессами ФГБОУ ВПО НИУ «МЭИ».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Шевчук Валерий Петрович

Официальные оппоненты: профессор кафедры «Автоматизация, управление, мехатроника» ФГБОУ ВПО
«Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»,
доктор технических наук, профессор
Большаков Александр Афанасьевич

профессор кафедры Информационных технологий ГБОУ ВПО Московской области «Академия социального управления», доктор технических наук,
Мокрова Наталия Владиславовна

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет», кафедра Автоматизации производственных процессов

Защита диссертации состоится «10» апреля 2014 г. в 14 часов 00 минут в малом актовом зале на заседании диссертационного совета Д 212.157.14 при ФГБОУ ВПО НИУ «МЭИ» по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д.17.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим присылать по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, Ученый совет ФГБОУ ВПО НИУ «МЭИ».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО НИУ «МЭИ».

Автореферат разослан « 01 » марта 2014 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.157.14
кандидат технических наук, доцент

В.П. Зверьков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Теплообменное оборудование в технологических процессах абсорбции, дистилляции, ректификации является сложным и энергоемким, поэтому актуальными являются вопросы энерго- и ресурсосбережения. Моделирование этих процессов, их оптимизация и модернизация – одна из основных задач успешного развития не только нефтеперерабатывающей отрасли. Ректификационные установки находятся в основном ряде промышленных объектов управления всего энергетического комплекса. Процесс ректификации является достаточно гибким, с точки зрения получения конечных и промежуточных продуктов требуемого состава, но при этом характеризуется низким коэффициентом полезного действия и высокими удельными затратами энергии.

Существующие системы автоматического управления процессом ректификации основаны на применении локальных контуров регулирования, зачастую контролируя лишь режимные параметры объекта, без учета потерь сырья, что отрицательно сказывается на эффективности работы установки в целом. Выдвигается предположение, что эффективность работы ректификационной колонны можно увеличить за счет структурного преобразования систем управления, применив к ним надстройку, позволяющую свести к минимуму потери сырья. Таким образом, это позволит частично решить обозначенную проблему энергоэффективности, сократить финансовые издержки производства на дополнительную обработку вторичного сырья, повысить качество выпускаемого продукта, максимально эффективно организовать процессы управления. Актуальность выбранного направления исследований также подтверждается грантом РФФИ «Моделирование переходных процессов в ректификационной колонне тарельчатого типа по критерию эффективности работы колонны» (проект 10-08-00125-а, [6, 7]).

Целью работы является повышение качества управления процессом ректификации за счет применения алгоритмов текущей идентификации и адаптации.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

- произведен анализ технологического процесса и способов управления процессом ректификации;
- выбраны и обоснованы критерии управления процессом ректификации;
- получены и проверены на адекватность математические модели элементов системы управления, в том числе модели измерительной информации, необходимые для имитации процессов управления;
- разработаны алгоритмы управления по выбранным критериям;
- исследованы работоспособность и эффективность алгоритмов управления методом имитационного моделирования в условиях, наиболее приближенных к реальным, т. е. с учетом дрейфа характеристик объекта управления и помех измерения.

Методы исследования. При выполнении работы использовались методы теории автоматического управления, имитационного и математического моделирования, методы теории случайных процессов.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Предложен новый критерий качества управления верхней точкой температурного профиля ректификационной колонны, заключающийся в вычислении зна-

чения отклонения текущей концентрации сырья в питающей смеси от прогнозируемой в потоке дистиллята [2, 5, 9, 12, 21].

2. Предложен критерий управления эффективностью работы ректификационной установки путем минимизации суммарных потерь сырья на интервале управления [2, 5, 9, 12].
3. Разработана модель химического реактора, с выхода которого сырье поступает на вход ректификационной колонны. Полученная модель отличается от известных тем, что адаптирована к задаче имитации сигнала концентрации сырья в питающей смеси на колонну, что позволяет учесть «вклад» химического реактора в формировании температуры тарелки питания [2].
4. Предложен алгоритм вычисления прогноза потерь сырья по верху ректификационной колонны [2, 5, 8, 9, 11, 12, 14-16].
5. Предложен алгоритм идентификации текущего значения коэффициента дрейфа у критерия качества управления верхней точкой температурного профиля, вычисляемого на каждом периоде управления и характеризующего угол наклона аппроксимирующей кривой потерь сырья в верхней части колонны. Коэффициент дрейфа можно условно считать равным отношению измеренных потерь сырья к прогнозируемым [1, 2, 5, 8].
6. Предложен новый подход в управлении ректификационной колонной, отличающийся от известных тем, что реализуется алгоритм адаптивного управления верхней частью колонны на основании вычисленного значения потерь сырья, при этом заданием для регулятора расхода дистиллята (флегмы) является сигнал, пропорциональный прогнозируемым потерям сырья [2, 5, 8].
7. Предложен алгоритм адаптивного управления верхней точкой температурного профиля колонны, отличающийся от известных тем, что заданием регулятору температуры верха служит сигнал от компенсатора возмущения по концентрации сырья в питании [5-8].

Практическая значимость работы. Основные результаты диссертационного исследования, имеющие практическую значимость, заключаются в следующем:

1. Разработаны пакеты прикладных программ (ППП) для формирования моделей измерительной информации и для проверки их на адекватность, для имитационного моделирования работы всей колонны в режиме реального времени, а также для визуализации процессов управления в ректификационной колонне.
2. Разработан ППП для вычисления значений потерь сырья, критерия управления и эффективности работы установки.
3. Реализован лабораторный стенд, демонстрирующий работу алгоритма оптимального управления температурным профилем ректификационной колонны.

Соответствие паспорту специальности. Указанная область исследования соответствует паспорту специальности 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в энергетике)», а именно: пункту 4 – «Теоретические основы и методы математического моделирования организационно-технологических систем и комплексов, функциональных задач и объектов управления и их алгоритмизация»; пункту 5 – «Теоретические основы, средства и методы промышленной технологии создания АСУ ТП, АСУП, АСТПП и др.»; пункту 6 – «Научные основы, модели и методы идентификации производственных процессов, комплексов и интегрированных систем управления»; пункту 10 – «Мето-

ды синтеза специального математического обеспечения, пакетов прикладных программ и типовых модулей функциональных и обеспечивающих подсистему АСУ ТП, АСУП, АСТПП и др.»; пункту 13 – «Теоретические основы и прикладные методы анализа и повышения эффективности, надежности и живучести АСУ на этапах их разработки, внедрения и эксплуатации».

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на XVII, XVIII, XIX Международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, 2011, 2012, 2013 гг.), IX и X Всероссийских научных конференциях молодых ученых, аспирантов и студентов «Информационные технологии, системный анализ и управление» (г. Таганрог, 2011 и 2012 гг.), Международной научно-практической конференции (г. Прага, 2012 г.), Второй, Третьей и Четвертой Всероссийских научно-практических конференциях «Ресурсо-энергосбережение и эколого-энергетическая безопасность промышленных городов» (г. Волжский, 2008, 2010, 2012 гг.), Межрегиональной конференции «Моделирование и создание объектов ресурсосберегающих технологий» (г. Волжский, 2009 г.), а также на четырнадцатой межвузовской научно-практической конференции молодых ученых и студентов (г. Волжский, 2008 г.).

Внедрение результатов работы. Результаты работы в виде экспериментальной установки используются в лабораторном практикуме при изучении дисциплин «Теория автоматического управления», «Проектирование систем автоматизации», «Моделирование динамических систем» в филиале НИУ «МЭИ» в г. Волжском.

Достоверность результатов исследований основана на экспериментальных данных, полученных в технологическом процессе очистки МТБЭ на предприятии ОАО «Каучук» (г. Волжский, Волгоградская обл.). Эксперименты по проверке работоспособности алгоритмов управления проводились методом имитационного моделирования, с учетом дрейфа характеристик объекта управления и помех измерения.

Положения, выносимые на защиту.

1. Критерий качества управления верхней точкой температурного профиля ректификационной колонны [2, 5, 9, 12, 21].
2. Критерий управления эффективностью работы ректификационной установки [2, 5, 9, 12].
3. Математическая модель химического реактора, адаптированная к задаче имитации сигнала концентрации сырья в питающей смеси на колонну [2].
4. Алгоритм вычисления прогноза потерь сырья по верху ректификационной колонны [2, 5, 8, 9, 11, 12, 14-16].
5. Алгоритм идентификации текущего значения коэффициента дрейфа у критерия качества управления верхней точкой температурного профиля [1, 2, 5, 8].
6. Алгоритм адаптивного управления верхней частью ректификационной колонны [2, 5, 8].
7. Алгоритм адаптивного управления верхней точкой температурного профиля колонны [5-8].
8. Методика имитационного моделирования процессов управления температурным профилем ректификационной колонны тарельчатого типа.
9. ППП для визуализации процесса управления ректификационной установкой.

Публикации. Всего по теме диссертации опубликовано 21 научная работа, в том числе: четыре в рецензируемых журналах перечня ВАК, два патента на полезную модель, один патент на изобретение и положительное решение о выдаче патента.

Лично автором проведены следующие этапы научного исследования:

1. Произведен выбор критериев управления процессом ректификации по эффективности работы.
2. Разработано и проверено на адекватность математическое описание нижней и верхней точек профиля концентраций колонны, а также химического реактора.
3. Разработаны ППП для формирования моделей измерительной информации и проверки их адекватности, для имитационного моделирования работы всей колонны в режиме реального времени.
4. Разработаны ППП для вычисления значений потерь сырья по верху, критерия качества управления и эффективности работы установки, а также для визуализации процессов управления в колонне.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы из 109 наименований и одного приложения. Общий объем работы составляет 167 страниц, в том числе 58 рисунков и 6 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цель и задачи исследования, показана научная новизна, практическая значимость и апробация результатов, приводится краткое содержание всех глав диссертационной работы, данные о ее структуре и объеме.

В первой главе показаны особенности технологического процесса ректификации: его сущность и специфика, аппаратное оформление, основные виды процесса. Также производится анализ известных алгоритмов управления процессом ректификации, современных программных средств, с помощью которых можно разработать ППП для создания системы автоматического управления процессом. Рассмотрены особенности обработки хроматографической информации. На основе проведенного исследования выявлено, что в настоящее время хроматография превосходит существующие технологии разделения и анализа многокомпонентных смесей. Хроматограмма является носителем как качественной информации о виде компонентов смеси, так и количественной – об их концентрации. Модель сигнала от промышленного хроматографа может быть представлена в виде прямоугольного импульса, который обеспечивает стационарную цифровую последовательность управляющих воздействий и, тем самым, обеспечивает возможность применения хроматографической информации в алгоритмах адаптации, идентификации и прогноза.

Вторая глава посвящена математическому описанию элементов системы управления и проверке моделей на адекватность. В результате анализа технологического процесса производится выбор **критерия качества управления** верхней частью температурного профиля ректификационной колонны, определяемого как значение отклонения текущей концентрации сырья в питающей смеси от прогнозируемой в потоке дистиллята, т.е. величиной текущих потерь сырья по верху колонны,

вычисляемой как разность между приходящим в колонну с питанием количеством сырья, $f_u(j \cdot T_s)$, и отводимым в потоке дистиллята, прогнозируемым по математической модели, $f_n(j \cdot T_s)$ [13]:

$$\begin{cases} \Delta J_\epsilon(j \cdot T_s) = f_u(j \cdot T_s) - K_{\text{др}} \cdot f_n(j \cdot T_s), \\ \Delta J_\epsilon(j \cdot T_s) \geq 0, f_n(j \cdot T_s) \geq 0, f_u(j \cdot T_s) \geq 0. \end{cases} \quad (1)$$

где $\Delta J_\epsilon(j \cdot T_s)$ – потери сырья при робастной стабилизации флегмового числа; j – порядковый номер хроматограммы; T_s – время одного цикла измерения концентрации промышленным хроматографом (в секундах); $f_n(j \cdot T_s)$ – прогноз количества сырья (потерь) в дистилляте; $K_{\text{др}}$ – коэффициент дрейфа (настроечный); $f_u(j \cdot T_s)$ – количество сырья (потери) в линии питания.

В качестве **критерия управления эффективностью работы колонны** предлагается рассматривать обеспечение минимума потерь сырья за счет адаптивного управления (2):

$$\begin{cases} J_\epsilon(N_m \cdot T_s) \Rightarrow \min_{K_{\text{др}}} \sum_{j=0}^{N_m} [f_u(j \cdot T_s) - K_{\text{др}}(j \cdot T_s) \cdot f_n(j \cdot T_s)] \\ J_\epsilon(N_m \cdot T_s) \geq 0, f_n(j \cdot T_s) \geq 0, f_u(j \cdot T_s) \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

где $J_\epsilon(N_m \cdot T_s)$ – суммарные потери сырья при робастной стабилизации флегмового числа на интервале времени $N_m \cdot T_s$, $K_{\text{др}}(j \cdot T_s)$ – коэффициент дрейфа (коэффициент параболы, см. рисунок 1), T_s – время одного цикла измерения концентрации промышленным хроматографом, N_m – объем выборки для оценки потерь на интервале управления.

Критерий (2) представляет собой функциональную зависимость с ярко выраженным минимумом (см. рисунок 1), что позволяет предложить для управления верхней частью колонны адаптивное управление изменением расхода дистиллята, с текущей идентификацией коэффициента дрейфа.

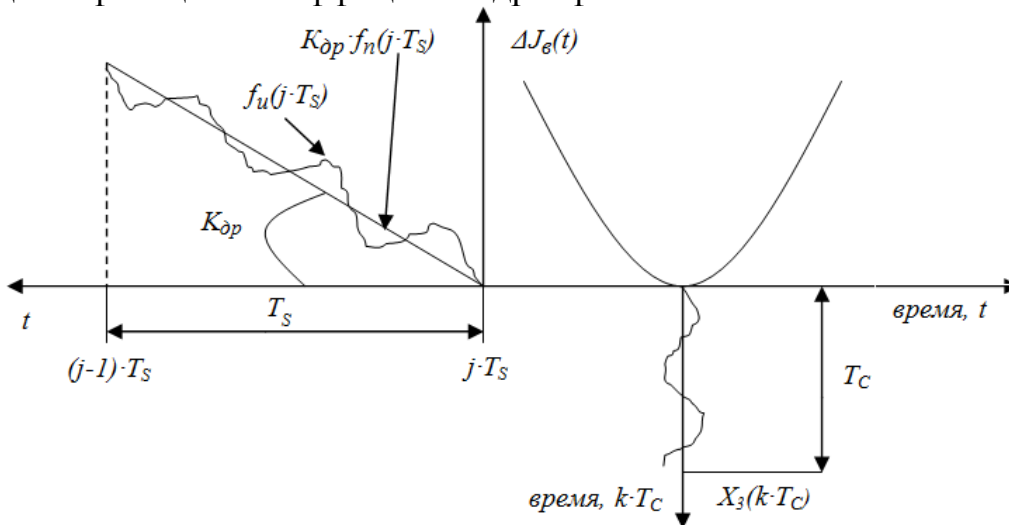


Рисунок 1 – Образование потерь сырья при робастной стабилизации флегмового числа

Эффективность работы верхней части ректификационной установки (см. рисунок 2) можно оценить как отношение текущего значения концентрации изобутана,

измеренного в потоке дистиллята, к текущему значению его концентрации, прогнозируемому по математической модели компенсатора:

$$\mathcal{E}P1(j \cdot T_s) = \frac{Z_5(j \cdot T_s)}{N_k - 1} \cdot \frac{1}{N_k} \cdot \sum_{k=0}^k Z_7(k \cdot T_c), \quad (3)$$

где $\mathcal{E}P1(j \cdot T_s)$ – эффективность работы верхней части колонны; $Z_5(j \cdot T_s)$ – текущее значение концентрации изобутана, измеряемое хроматографом на линии отвода дистиллята; $Z_7(k \cdot T_c)$ – текущее значение концентрации изобутана, прогнозируемое по модели компенсатора; T_c – время опроса датчика (модуля ввода аналоговых сигналов контроллера); N_k – количество элементов в массиве; k – порядковый номер элементов массива.

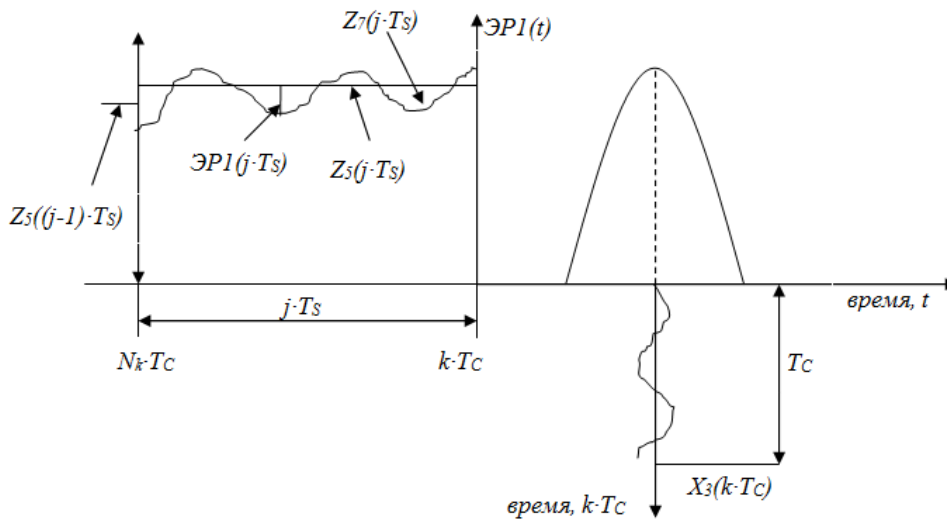


Рисунок 2 – Эффективность функционирования верхней части колонны

Эффективность работы всей ректификационной установки можно определить как отношение текущего значения концентрации целевого продукта, измеренного в потоке кубовых остатков, к текущему значению его концентрации, прогнозируемой по математической модели колонны:

$$\mathcal{E}P2(j \cdot T_s) = \frac{Z_6(j \cdot T_s)}{N_k - 1} \cdot \frac{1}{N_k} \cdot \sum_{k=0}^k Z_8(k \cdot T_c), \quad (4)$$

где $Z_6(j \cdot T_s)$, $Z_8(k \cdot T_c)$ – текущие значения концентрации целевого продукта, измеряемое хроматографом и прогнозируемое по математической модели колонны соответственно.

Известно, что критерий (4) представляет собой экстремальную зависимость с ярко выраженным максимумом, что позволяет рекомендовать его для управления эффективностью работы нижней части ректификационной колонны.

Математические модели нижней (5) и верхней (6) частей колонны представляют собой системы уравнений, состоящие из дифференциальных уравнений материального баланса, описывающего изменение качественного состава смеси, и теплового баланса, характеризующего крайние точки температурного профиля:

$$\begin{cases} 3,78 \cdot \frac{dZ_6(t)}{dt} + Z_6(t) = 2,08 \cdot Z_4(t-2,81) \\ 3,31 \cdot \frac{dY_1(t)}{dt} + Y_1(t) = 2,63 \cdot Z_4(t-1,53), \end{cases} \quad (5)$$

где $Z_4(t)$, $Z_6(t)$ – текущие значения концентрации целевого продукта в питающей смеси колонны и в нижней части колонны соответственно, $Y_1(t)$ – текущее значение температуры низа (куба) колонны.

$$\begin{cases} 1,74 \cdot \frac{dZ_5(t)}{dt} + Z_5(t) = 1,97 \cdot Z_3(t-2,05) \\ 1,4 \cdot \frac{dY_8(t)}{dt} + Y_8(t) = 1,05 \cdot Z_3(t-0,52), \end{cases} \quad (6)$$

где $Z_3(t)$, $Z_5(t)$ – текущие значения концентрации сырья (изобутана) в питающей смеси и в верхней части колонны, $Y_8(t)$ – текущее значение температуры верха колонны.

Для обеспечения функционирования программной имитации модели ректификационной установки потребовалось получение моделей изменения концентраций на питающую тарелку колонны, что было реализовано с помощью модели химического реактора:

$$\begin{cases} 0,167 \cdot \frac{dY_{10}(t)}{dt} + Y_{10}(t) = -36 \cdot X_6(t-0,01) \\ 5,36 \cdot \frac{dZ_3(t)}{dt} + Z_3(t) = 1,01 \cdot Z_1(t-2,06) \\ 5,23 \cdot \frac{dZ_4(t)}{dt} + Z_4(t) = 2,38 \cdot Z_2(t-1,74), \end{cases} \quad (7)$$

где $Z_1(t)$, $Z_2(t)$ – текущие значения концентраций изобутана и метанола в шихте соответственно, $Z_3(t)$, $Z_4(t)$ – текущие значения концентрации изобутана и целевого продукта в питающей смеси колонны соответственно, $Y_{10}(t)$ – текущее значение температуры питающей смеси, формируемое химическим реактором, $X_6(t)$ – текущее значение расхода парового конденсата, охлаждающего химический реактор.

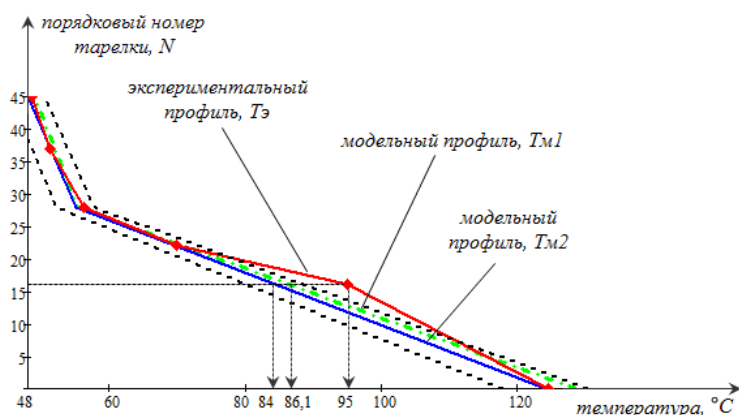
Модель температуры тарелки питания, $Y_5(t)$, принимается как среднее значение между температурой паров, поступающих на тарелку питания снизу, температурой жидкости, поступающей на тарелку питания сверху, и температурой смеси, проходящей из химического реактора [2-4, 10, 17, 18-20]. Настраиваемые коэффициенты определяются методом пошагового поиска.

$$Y_5(t) = \frac{1}{3} \cdot (1,189 \cdot Y_4(t) + 1,847 \cdot Y_6(t) + 1,285 \cdot Y_9(t)). \quad (8)$$

На рисунке 3 представлены результаты проверки математической модели температурного профиля ректификационной колонны тарельчатого типа на адекватность. Отклонение прогнозируемого по уравнениям (5-7) температурного профиля от модельного по регламенту не превосходит 5 %, что видно из рисунка 3. Поэтому математическую модель можно считать адекватной и применять для разработки алгоритмов управления.

Посредством статистического моделирования были получены модели измерительной информации, адекватность которых проверялась по статистикам Стьюдента

и Пирсона. Контроль адекватности математических моделей основных каналов управления проводился методом имитационного моделирования. Все полученные модели адекватно описывают реальные процессы, происходящие в ректификационной установке. Следовательно, их можно применять для разработки алгоритмов управления.



$T_э$ – экспериментальный профиль [3, 4], T_{M1} – модельный профиль согласно (5)-(7),
 T_{M2} – модельный профиль (по регламенту)

Рисунок 3 – Измеренный и прогнозируемые профили по всей высоте колонны

В третьей главе осуществлена разработка адаптивного алгоритма управления верхней точкой температурного профиля ректификационной колонны тарельчатого типа и робастной стабилизации его нижней точки.

Для адаптивного управления верхней точкой температурного профиля колонны предложено устройство [1, 5, 8], функционирование которого основано на компенсации возмущения со стороны концентрации питающей смеси. При этом нижняя точка температурного профиля должна быть жёстко фиксирована стабилизацией расхода перегретого пара в кипятильник куба колонны (см. рисунок 4). Задача, решаемая предлагаемым устройством, заключается в поддержании заданного профиля температур по всей высоте колонны.

Устройство состоит из ректификационной колонны 1, оснащенной датчиками температур 2, дефлегматора 3, регулятора расхода хладагента 4, блока формирования задания 5, компенсатора возмущений 6, теплообменника 7, расположенного на линии отвода кубового остатка 23, регулятора температуры низа колонны 8, регулятора расхода перегретого пара 9, регулятора концентрации целевого продукта в нижней части колонны 10, блока идентификации текущего значения эффективности работы ректификационной колонны 11, регулятора расхода греющей смеси 12, теплообменника 13, расположенного на линии подачи питающей смеси 19, регулятора температуры верха колонны 14, регулятора расхода флегмы 15, регулятора расхода целевого продукта 16, регулятора уровня кубовой жидкости в колонне 17, регулятора температуры питающей смеси 18, хроматографов 20 и 21, расположенных на линии подачи питающей смеси 19 и на линии отвода целевого продукта 22 соответственно.

Для блока 14 входным параметром является приращение температуры, непосредственно связанное с оценкой приращения текущего значения концентрации сырья по верху колонны, определяемого в блоке 5 (см. рисунок 4) по формуле:

$$\Delta Z(j \cdot T_s) = Z_7(j \cdot T_s) - k_2 \cdot Z_9(j \cdot T_s), \quad (9)$$

Адаптивное управление верхней точкой температурного профиля реализуется применением каскадно-комбинированной системы регулирования (см. рисунок 5). Внутренний контур реализуется с помощью регулятора расхода хладагента ($W_{p.c}(p)$), заданием которому является сигнал от регулятора температуры верха ($W_{p.k}(p)$). Компенсатор случайных изменений концентрации питающей смеси ($W_k(p)$) формирует, в свою очередь, задание для регулятора температуры верха.

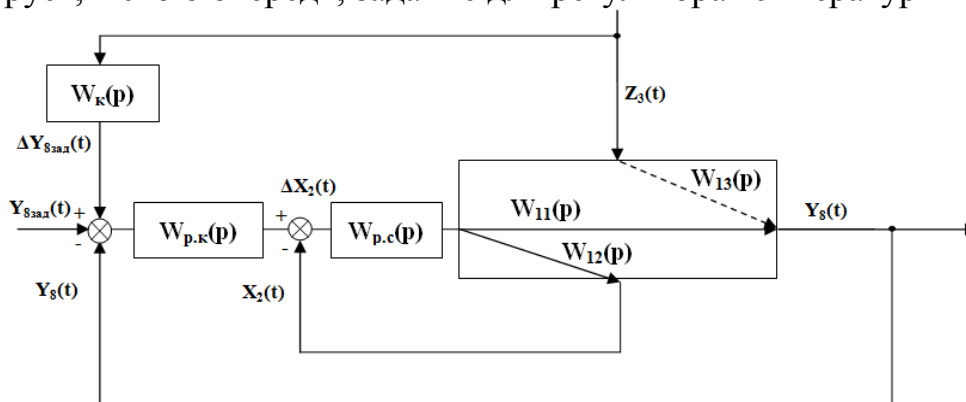


Рисунок 5 – Структурная схема системы управления верхней точкой температурного профиля

Помимо стационарных сигналов на объект управления действуют также и нестационарные (например, концентрация питания), поэтому критерий качества управления верхней частью колонны «дрейфует» в области значений параметров. Причинами дрейфа являются износ оборудования и инструмента, старение катализатора, накипь на поверхностях нагрева теплообменников и т.п. В результате этого, возникает необходимость адаптивного управления верхней точкой температурного профиля изменением расхода хладагента, что позволяет на основе измерения текущих входных и выходных параметров процесса постоянно корректировать значения основных управляющих воздействий.

На рисунке 6 представлены результаты моделирования по исследованию свойств критерия качества управления верхней частью ректификационной установки при ограниченном объеме выборки.

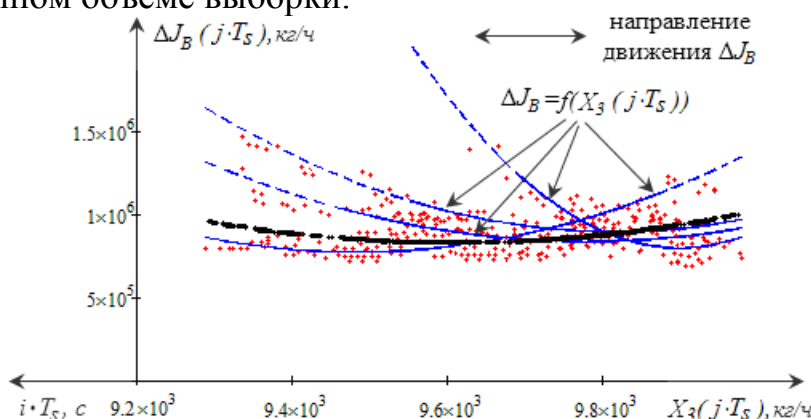


Рисунок 6 – Характеристика свойств критерия управления $\Delta J_6(j \cdot T_S)$

Из рисунка видно, траектория движения аппроксимирующей зависимости функции критерия представляет собой параболу и перемещается вдоль временной оси $i \cdot T_S$, т.е. «дрейфует». С течением времени полной реализации тренда потерь ΔJ_6 частные реализации критерия качества управления перемещаются в сторону вершины главной параболы (жирная линия), соответствующей минимуму потерь сырья

при определенном расходе отбираемого дистиллята. Именно эта траектория перемещения критерия, ΔJ_e во времени определяет свойства коэффициента дрейфа частных реализаций параболы, $K_{др}$, который и подлежит идентификации при адаптивном управлении.

Поиск коэффициента дрейфа, на периоде управления, $N_m T_s$, осуществляется на основе метода наименьших квадратов, согласно формуле:

$$K_{др}(N_m \cdot T_s) \approx \frac{\sum_{j=0}^{N_m} \Delta f_u(j \cdot T_s) \cdot \Delta X_3(j \cdot T_s)}{\sum_{j=0}^{N_m} (\Delta X_3(j \cdot T_s))^2}, \quad (11)$$

где $\Delta X_3(j \cdot T_s)$, $\Delta f_u(j \cdot T_s)$ – средние значения расхода отбираемого дистиллята и измеренных потерь сырья на длине одного цикла хроматографа соответственно, $N_m \cdot T_s$ – период управления (время идентификации).

Алгоритм формирования управляющего воздействия основан на методе градиентного поиска, позволяющем отслеживать дрейф оптимального режима и генерировать воздействие, компенсирующее этот дрейф. Для реализации данного алгоритма предпочтительно большое количество измерений. Однако чем больше измерений, тем длительнее происходит накопление информации и оптимальный режим «уплывает», возрастают потери при управлении. Поэтому существует компромисс (см. рисунок 13) между увеличением объема выборки и скоростью дрейфа, который и гарантирует оптимальный режим функционирования алгоритма управления.

Используя методику имитационного моделирования процесса управления ректификационной колонной по критерию качества управления (1) (см. рисунок 8), был получен график переходного процесса на тарелке питания, изображенный на рисунке 7.

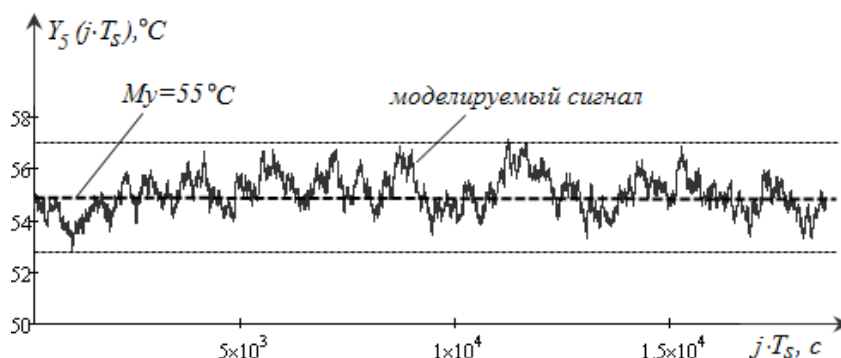


Рисунок 7 – Имитация текущих значений температуры тарелки питания

Четвертая глава посвящена исследованию работоспособности и эффективности разработанных алгоритмов управления температурным профилем колонны в условиях, наиболее приближенных к реальным. Проверка работоспособности проводилась методом имитационного моделирования.

При исследовании установлено, что каждому текущему значению коэффициента дрейфа соответствует определенный расход дистиллята на соответствующем периоде управления.

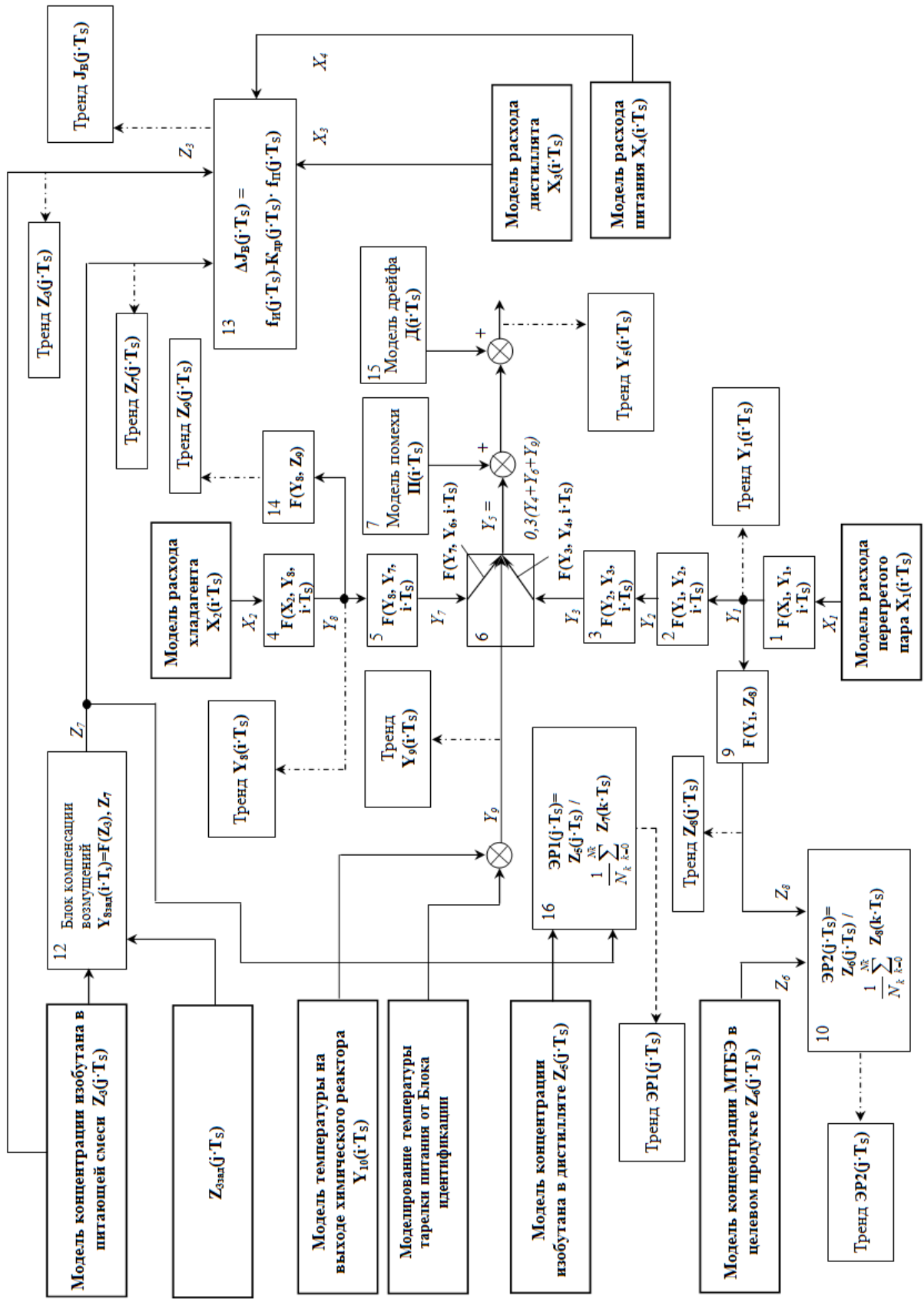


Рисунок 8 – Блок-схема программы имитационного моделирования разомкнутой системы

Значение текущего управляющего воздействия при робастной стабилизации определяется на основе метода градиентного поиска, при адаптивном же управлении – согласно формуле (10) (см. рисунок 9).

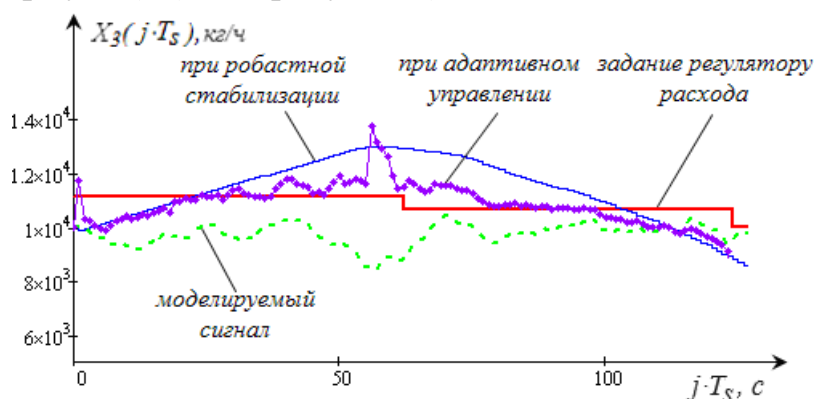


Рисунок 9 – Текущие значения управляющего воздействия

При этом текущие значения коэффициента дрейфа колеблются относительно выбранной стратегии изменения (см. рисунок 10). Прямая $K_{др}^{зад}$ характеризует заданное значение коэффициента дрейфа, зависимость $K_{др}^M$ определяет моделируемое.

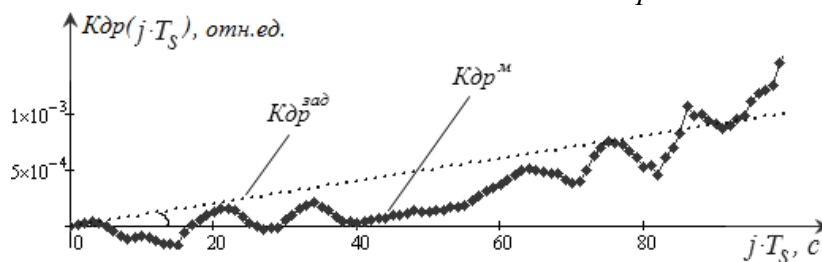


Рисунок 10 – Текущие значения коэффициента дрейфа

На рисунке 11 представлены два тренда, характеризующие суммарные потери сырья на интервале управления при адаптивном управлении и робастной стабилизации.

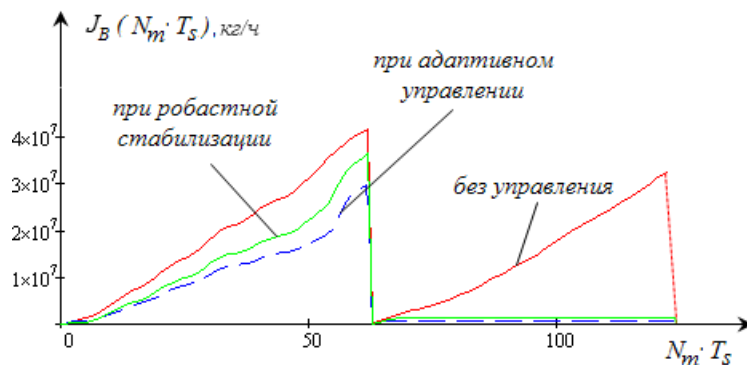


Рисунок 11 – Суммарные потери на периоде управления

На рисунке 12 продемонстрированы тренды текущих потерь сырья при имитации процессов управления в зависимости от текущего времени в рамках одного периода управления.

В результате анализа графиков можно сделать вывод о том, что робастная стабилизация эффективна, что подтверждается прохождением соответствующего тренда потерь сырья ниже тренда потерь сырья без управления. Однако, применение

системы адаптивного управления целесообразнее, и это доказывает соответствующий тренд потерь сырья, находящийся ниже двух остальных трендов.

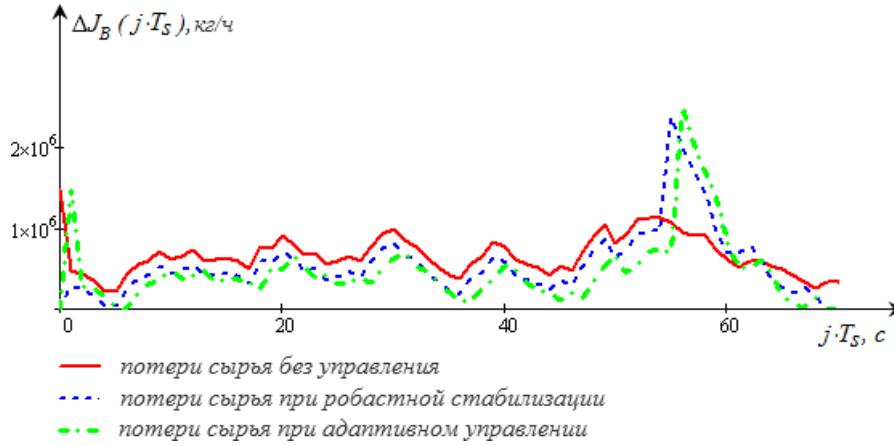


Рисунок 12 – Имитация процессов управления

Количественно эффективность применения управления в рассматриваемом процессе характеризует отношение:

$$M1(N_m \cdot T_s) = \frac{\sum_{j=0}^{N_m} \Delta J_{\theta}^p(j \cdot T_s)}{\sum_{j=0}^{N_m} \Delta J_{\theta}(j \cdot T_s)}, \quad (12)$$

где $M1(N_m \cdot T_s)$ – относительные потери на периоде управления (идентификации), $\Delta J_{\theta}(j \cdot T_s)$, $\Delta J_{\theta}^p(j \cdot T_s)$ – потери сырья без управления и при робастной стабилизации на периоде управления (идентификации), $N_m = m \cdot T_s$ – объём выборки для оценки потерь (период идентификации или период управления).

Эффективность алгоритма текущей идентификации (11) в рассматриваемой системе управления можно определить как отношение потерь сырья при адаптивном управлении к потерям сырья при робастной стабилизации, что выражается зависимостью:

$$M2(N_m \cdot T_s) = \frac{\sum_{j=0}^{N_m} \Delta J_{\theta}^{ad}(j \cdot T_s)}{\sum_{j=0}^{N_m} \Delta J_{\theta}^p(j \cdot T_s)}, \quad (13)$$

где $M2(N_m \cdot T_s)$ – относительные потери на периоде управления (идентификации), $\Delta J_{\theta}^{ad}(j \cdot T_s)$, $\Delta J_{\theta}^p(j \cdot T_s)$ – потери сырья при адаптивном управлении и робастной стабилизации на периоде управления соответственно.

В результате имитационного моделирования процесса управления по предлагаемому алгоритму были получены графики, представленные на рисунке 13. Из них видно, что компромиссное время накопления информации для идентификации коэффициента дрейфа достигается при накоплении 63-х значений хроматографа.

Именно при этом значении времени накопления информации для текущей идентификации коэффициента дрейфа достигаются минимальные потери сырья.

Из рисунка 13 видно, что жесткая стабилизация приводит к сокращению потерь на 27 % в сравнении с этим же показателем без управления. Следует также отметить, что при накоплении 63-х значений хроматографа потери сырья при адаптивном управлении составляют 86 % потерь сырья при робастной стабилизации.

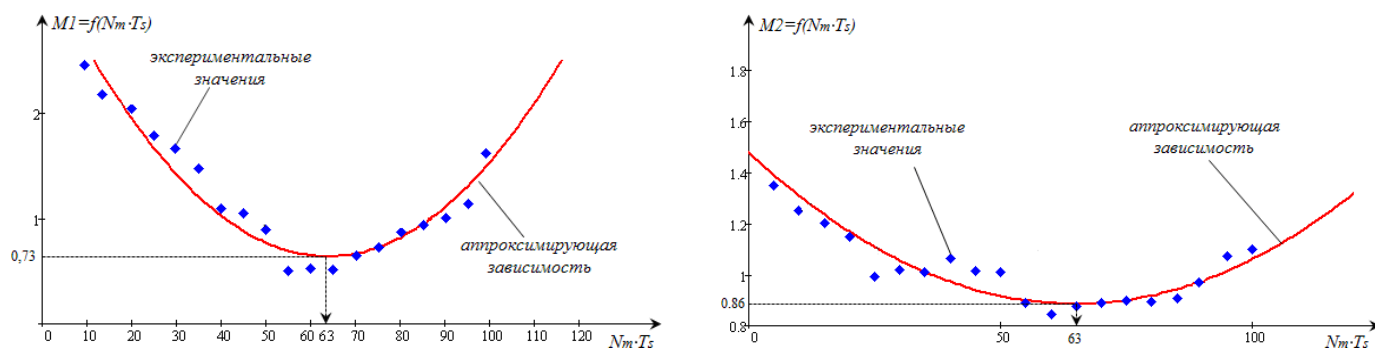


Рисунок 13 – Эффективность работы алгоритма идентификации (13)

Графики зависимости значений эффективности работы верха (3) ЭР1($j \cdot T_s$) и всей колонны (4) ЭР2($j \cdot T_s$) представлены на рисунке 14.

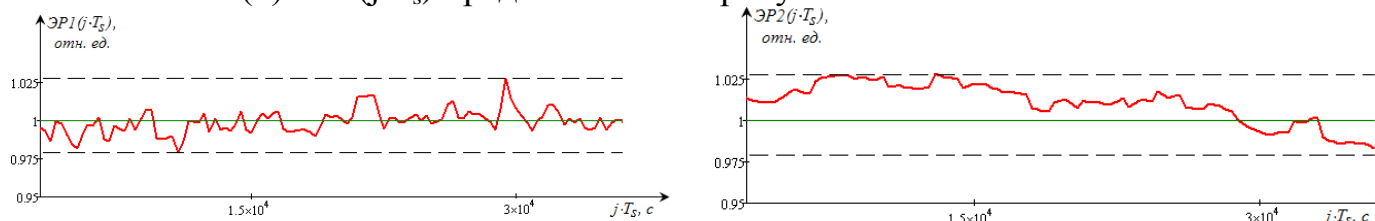


Рисунок 14 – Эффективность работы верха (3) и всей колонны (4)

Имитация процессов управления технологическим процессом проводилась также с применением интегрированной информационной системы Trace Mode 6.0. Разработан ППП «Адаптивное управление процессом ректификации», представляющий собой автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора-технолога и состоящий из набора программ по визуализации как критериев управления, так и основных режимных параметров управления технологическим процессом.

В приложении представлен эскизный проект предлагаемого решения.

Выводы

1. Предложен новый критерий качества управления верхней точкой температурного профиля ректификационной колонны, заключающийся в вычислении значения отклонения текущей концентрации сырья в питающей смеси от прогнозируемой в потоке дистиллята [2, 5, 9, 12, 21].
2. Предложен критерий управления эффективностью работы ректификационной установки путем минимизации суммарных потерь сырья на интервале управления [2, 5, 9, 12].
3. Разработана модель химического реактора, с выхода которого сырье поступает на вход ректификационной колонны. Полученная модель адаптирована к задаче имитации сигнала концентрации сырья в питающей смеси на колонну, что позволяет учесть «вклад» химического реактора в формировании температуры тарелки питания [2].

4. Предложен алгоритм вычисления прогноза потерь сырья по верху ректификационной колонны [2, 5, 8, 9, 11, 12, 14-16].
5. Предложен алгоритм идентификации текущего значения коэффициента дрейфа у критерия качества управления верхней точкой температурного профиля, вычисляемого на каждом периоде управления и характеризующего угол наклона аппроксимирующей кривой потерь сырья в верхней части колонны. Коэффициент дрейфа можно условно считать равным отношению измеренных потерь сырья к прогнозируемым [1, 2, 5, 8].
6. Предложен новый подход в управлении ректификационной колонной, отличающийся от известных тем, что адаптивное управление верхней частью реализуется на основании вычисленного значения потерь сырья, при этом заданием для регулятора расхода дистиллята (флегмы) является сигнал, пропорциональный прогнозируемым потерям сырья [2, 5, 8].
7. Предложен алгоритм адаптивного управления верхней точкой температурного профиля колонны, отличающийся от известных тем, что заданием регулятору температуры верха служит сигнал от компенсатора возмущения по концентрации сырья в питании [5-8].

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

в журналах из перечня ВАК РФ

1. Шаровина С.О., Шевчук В.П. Способ автоматического управления температурным профилем теплотехнического объекта // Альтернативная энергетика и экология, 2013, № 16 (в печати).
2. Шаровина С.О., Шевчук В.П. Управление температурным профилем ректификационной колонны тарельчатого типа // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2013. – № 3. – С. 39 – 47.
3. Агринская С.А., Филатова С.О., Шевчук В.П. Система управления эффективностью работы ректификационной колонной тарельчатого типа // Приборы и системы. Управление, контроль и диагностика. 2010, № 7, с. 25 – 29.
4. Агринская С.А., Филатова С.О. Супервизорное управление ректификационной колонной тарельчатого типа // Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия Прогрессивные технологии в машиностроении. Вып.6: межвуз. сб. науч. ст. № 12 (72) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – С. 69 – 70.

в других изданиях

5. Пат. 122033 на полезную модель, МПК: В 01 D 3/42. Устройство автоматического управления процессом ректификации / Шевчук В.П., Шаровина С.О., Агринская С.А.; заявитель и патентообладатель «НИУ «МЭИ». – № 2012112672/05; заявл. 03.04.12; опубл. 29.11.12, БИ № 32.
6. Пат. 104475 на полезную модель, МПК: В 01 D 3/42. Устройство автоматического регулирования процессом ректификации / Шевчук В.П., Агринская С.А., Филатова С.О.; заявитель и патентообладатель «Московский энергетический институт». – № 2010150625/05; заявл. 10.12.10; опубл. 20.05.11, БИ № 14.
7. Пат. 2449827 на изобретение, МПК: В 01 D 3/42. Устройство автоматического регулирования процесса ректификации / Шевчук В.П., Агринская С.А.,

- Филатова С.О.; заявитель и патентообладатель «Московский энергетический институт». – № 2010148090/05; заявл. 26.11.10; опубл. 10.05.12, БИ № 13.
8. Шевчук В.П., Агринская С.А., Шаровина С.О. Способ автоматического управления процессом ректификации и устройство для его реализации // Положительное решение о выдаче патента на изобретение по заявке № 2012145926 от 11.11.2013 г.//МПК: В 01 D 3/42, G 05 D 27/00.
 9. Шаровина С.О., Шевчук В.П. Устройство автоматического управления ректификационной колонной // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Тез. докл. XIX МНТК студентов и аспирантов (28 февраля - 1 марта 2013 г.): В 4-х т. М.:МЭИ, 2013. Т.4. С. 175.
 - 10.Агринская С.А., Филатова С.О. Адаптивные алгоритмы управления температурным профилем ректификационной колонны // Инновационные информационные технологии: Материалы международной научно-практической конференции. / Под. ред. С.У. Увайсова; Отв. за вып. И.А. Иванов, Л.А. Агеева, Д.А. Дубоделова, В.Е. Еремина – М.: МИЭМ, 2012. – С. 239 – 240.
 - 11.Шаровина С.О., Шевчук В.П. Модель бинарной ректификации // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Тез. докл. XVIII МНТК студентов и аспирантов (1-2 марта 2012 г.): В 4-х т. М.:МЭИ, 2012. Т.4. С. 234.
 - 12.Шаровина С.О., Шевчук В.П. Управление профилем изменения температур ректификационной колонны // Информационные технологии, системный анализ и управление – ИТСАиУ-2012/ Сборник трудов X Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. – Таганрог: Изд-во Южного федерального университета, 2012 – Т.2.– С. 228 – 231.
 - 13.Шаровина С.О., Шевчук В.П. Выбор критериев управления процессом бинарной ректификации // Ресурсо-энергосбережение и эколого-энергетическая безопасность промышленных городов: Четвертая Всероссийская научно-практическая конференция, г. Волжский, 25-28 сентября 2012 г. / Сборник материалов конференции. – Волжский: Филиал МЭИ в г. Волжском, 2012. – С. 134 – 135.
 - 14.Шаровина С.О., Шевчук В.П. Модель бинарной ректификации // IX Всероссийская научная конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Информационные технологии, системный анализ и управление»: Сборник материалов. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. – Т.2. – С. 11–13.
 - 15.Шаровина С.О., Шевчук В.П. Робастное управление группой колонн // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Тез. докл. XVII МНТК студентов и аспирантов (24-25 февраля 2011 г.): В 3-х т. М.:МЭИ, 2011. Т.3. С. 216 – 217.
 - 16.Шаровина С.О., Шевчук В.П. Робастное управление группой колонн // Волжский: ВФ МЭИ. Сб. науч. статей третьей Всероссийской научно-практической конференции «Ресурсоэнергосбережение и эколого-энергетическая безопасность промышленных городов», 2010. – С. 123 – 126.
 - 17.Агринская С.А., Филатова С.О. САР эффективности работы ректификационной колонны тарельчатого типа // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Шестнадцатая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. В 3 т. Т.3. М.: Издательский дом МЭИ. – 2010. – С. 255 – 256.
 - 18.Агринская С.А., Филатова С.О. Оптимальное управление ректификационной колонной по критерию эффективности работы // Моделирование и создание объектов энерго-ресурсосберегающих технологий: Межрегиональная научно-

