

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
В АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

THERMODYNAMIC ANALYSIS IN RENEWABLE ENERGY

Статья поступила в редакцию 31.08.15. Ред. пер. № 2337

The article has entered in publishing office 31.08.15. Ed. reg. No. 2337

УДК 681.3-621.3, 519.7

doi: 10.15518/isjaee.2015.17-18.015

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫМ ПРОФИЛЕМ
РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЫ

В.П. Шевчук, С.О. Шаровина

Филиал НИУ «МЭИ» в г. Волжском
404110 г. Волжский, Волгоградская обл., пр. Ленина, д. 69
Тел.: (8443) 21-01-72, e-mail: shevchukVP@mpei.ru

Заключение совета рецензентов: 03.09.15 Заключение совета экспертов: 06.09.15 Принято к публикации: 09.09.15

В работе исследуется эффективность совместной работы алгоритмов адаптивного управления положением средней точки температурного профиля, адаптивного управления положения нижней точки температурного профиля и адаптивного управления положением верхней точки температурного профиля.

Ключевые слова: адаптивное управление, робастная стабилизация, информативность показаний интеллектуальной измерительной техники, эффективность виртуальных приборов, оптимизация настроечных коэффициентов виртуального прибора.

RESEARCHING OF THE EFFECTIVENESS OF THE ADAPTIVE CONTROL
OF THE TEMPERATURE PROFILE OF THE DISTILLATION COLUMN

V.P. Shevchuk, S.O. Sharovina

Volzsky Branch of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
69 Lenin str., Volzhsky, Volgograd reg., 404110, Russia
Tel.: (8443) 21-01-72, e-mail: shevchukVP@mpei.ru.

Referred: 03.09.15 Expertise: 06.09.15 Accepted: 09.09.15

This paper studies the efficiency and collaboration algorithms for adaptive control position of a midpoint of the temperature profile, the adaptive control position of the lower points of the temperature profile and adaptive control of the position of the upper point of the temperature profile.

Keywords: adaptive management, robust stabilization, informative indications of intellectual measuring equipment, the efficiency of virtual devices, optimization of adjusting coefficients of the virtual instrument.



Валерий Петрович
Шевчук
Valery P. Shevchuk

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор, акад. Международной академии информатизации; акад. Метрологической академии РФ; гл. научный сотрудник филиала НИУ МЭИ в г. Волжском. Почетный работник высшего профессионального образования.

Образование: Московский институт химического машиностроения (1973).

Область научных интересов: вычислительные, локационные, телекоммуникационные системы и технические средства связи с объектами адаптивного управления.

Публикации: свыше 200 научных трудов, в том числе 1 учебник, 4 монографии, 24 учебных пособия; 15 а. с. и патентов РФ.

Information about the author: Dr. Sci., Prof., Acad. International Informatization Academy; Acad. Metrological Academy of the Russian Federation; Chief Scientific Officer of the Volzhsky branch of NRU MPEI. Honorary Worker of Higher Professional Education.

Education: Moscow Institute of Chemical Engineering (1973).

Research area: computers, locating, telecommunication systems and technical means of communication with the objects of adaptive management.

Publications: more than 200 scientific publications, including the 1 manual, 4 monographs, 24 textbooks; 15 patents of the RF.



Светлана Олеговна
Шаровина
Svetlana O. Sharovina

Сведения об авторе: канд. техн. наук, главный специалист ООО «МЦЭ-Инжиниринг».

Область научных интересов: идентификация и адаптация в системах управления, автоматизация проектирования систем оптимального управления технологическими процессами и производствами.

Публикации: 23, в том числе 4 патента РФ.

Information about author: PhD. tehn. sciences, chief specialist of "EMC Engineering".

Research area: identification and adaptation of control systems, automata-tization system design optimal process control and production.

Publications: 23, including 4 patents of the RF.

Введение. Постановка задачи исследования

Эффективность работы ректификационной колонны определяется функцией потерь сырья, $\Delta J_B(jT_S) = f\{Q(jT_S)\}$, минимум которой дрейфует в пространстве управляющих координат.

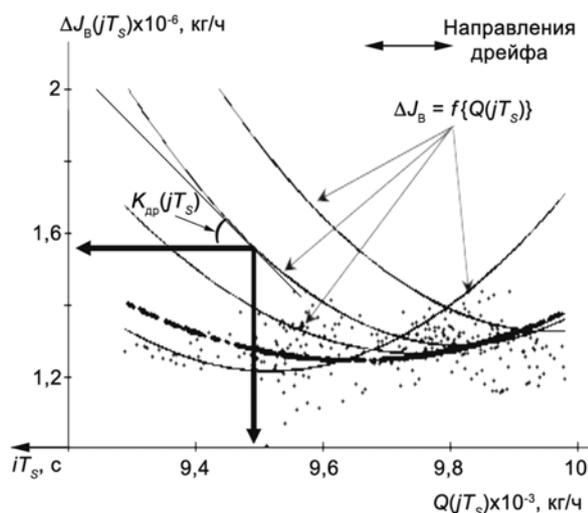


Рис. 1. Дрейф критерия управления эффективностью работы колонны
Fig. 1. The drift criterion of performance management column

На рис. 1 точками представлено поле экспериментальных данных, аппроксимация которых показывает, что зависимость текущих потерь сырья, $\Delta J_B(jT_S)$, от расхода отбираемого дистиллята, $Q(jT_S)$, дрейфует в реальном масштабе времени, а вместе с ней дрейфует и положение оптимального расхода, $Q(jT_S)$. Интенсивность перемещения зависимости характеризуется текущим значением скорости дрейфа, $K_{др}(jT_S)$, которая подлежит текущей идентификации при адаптивном управлении.

Автоматическое управление эффективностью функционирования процесса ректификации включает в себя (см. [1] и рис. 2) определение текущего температурного профиля колонны, вычисление текущего значения эффективности работы ректификационной колонны (см. рис. 2, блок 12), которое устанавливается в качестве задания регулятору температуры питающей смеси (блок 2).

Робастная стабилизация температуры нижней точки температурного профиля колонны осуществляется путем изменения расхода греющего пара в кипятильнике с коррекцией по концентрации целевого продукта и компенсации возмущений со стороны линии питания (см. рис. 2, блоки 3, 4, 5, 6, 7, 8).

Адаптивное управление верхней точкой температурного профиля осуществляется путем изменения расхода флегмы в зависимости от средней скорости



дрейфа, $K_{др}(NT_s)$, текущих потерь сырья, $\Delta J_v(jT_s) = f\{Q(jT_s)\}$. Текущие потери сырья по верху колонны вычисляются блоком 9 по соотношению

$$\Delta J_v(jT_s) = f(jT_s) - K_{др}(j(jT_s)) f_{и}(j(jT_s)),$$

где $K_{др}(jT_s)$ – текущее значение скорости дрейфа критерия управления (зависимости текущих потерь сырья от расхода отбираемого дистиллята); $f(jT_s)$ –

текущее значение количества сырья в дистилляте, прогнозируемое по математической модели верхней части ректификационной колонны; $f_{и}(jT_s)$ – текущее значение количества сырья в дистилляте, прогнозируемое блоком 9 по результатам измерения концентрации сырья в питающей смеси промышленным хроматографом 3.

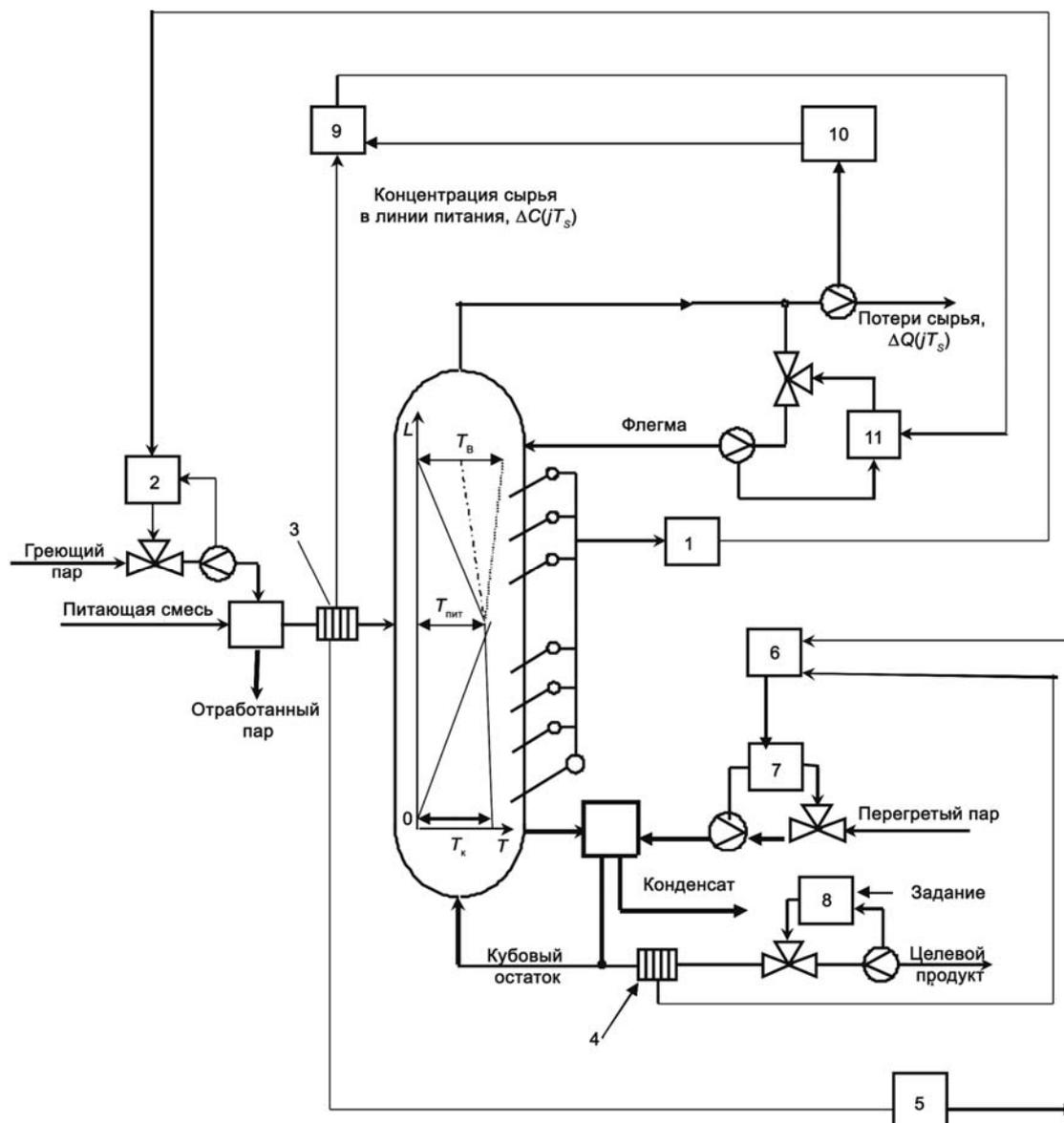


Рис. 2. Функциональная схема способа адаптивного управления [3]
Fig. 2. Functional diagram of the adaptive control method [3]

Текущее значение количества сырья в дистилляте прогнозируется по математической модели верхней части ректификационной колонны (блок 9) по соотношению $f(jT_s) = \Delta Q(jT_s)\Delta C(jT_s)$, где $\Delta Q(jT_s)$ – текущие значения показаний регистратора измерителя расхода отбираемого дистиллята (блок 10); $\Delta C(jT_s)$ – текущие значения концентрации сырья в линии питания с регистратора показаний промышленного хроматографа 3.

Текущее значение количества сырья в дистилляте, прогнозируемое по результатам измерения концентрации сырья в питающей смеси промышленным хроматографом 3, вычисляется блоком 9 по соотношению $f_{и}(jT_s) = \Delta Q_{п}(jT_s)\Delta C(jT_s)$, где $\Delta Q_{п}(jT_s)$ – текущие значения расхода питающей смеси; $\Delta C(jT_s)$ – текущие значения концентрации сырья в линии питания с регистратора показаний промышленного хроматографа 3.

Текущие значения скорости дрейфа, $K_{др}(jT_s)$, вычисляются блоком 9 по показаниям регистратора промышленного хроматографа (см. рис. 2, блок 3) и регистратора расхода отбираемого дистиллята (см. рис. 2, блок 10) как оценка производной зависимости текущих потерь сырья от расхода отбираемого дистиллята [2, 3]:

$$K_{др}(jT_s) \approx \frac{\Delta J_b(jT_s)}{\Delta Q(jT_s)} \approx \frac{\Delta C(jT_s)\Delta Q(jT_s)}{\Delta Q^2(jT_s)},$$

где $\Delta Q(jT_s)$ – текущие значения показаний регистратора измерителя расхода отбираемого дистиллята (блок 10); $\Delta C(jT_s)$ – текущие значения концентрации сырья в линии питания с регистратора показаний промышленного хроматографа 3.

Среднее значение отклонения расхода отбираемого дистиллята от величины задания на периоде идентификации вычисляется как

$$\Delta Q(NT_s) \approx \frac{1}{N+1} \sum_{j=0}^N \{\Delta Q(jT_s)\}.$$

Среднее значение отклонения концентрации сырья в питающей смеси от величины задания на периоде идентификации вычисляется как

$$\Delta C(NT_s) \approx \frac{1}{N+1} \sum_{j=0}^N \{\Delta C(jT_s)\}.$$

Количественная оценка скорости дрейфа текущих потерь сырья на периоде идентификации будет равна (см. рис. 2 и работу [1])

$$K_{др}(NT_s) \approx \frac{\sum_{j=0}^N \Delta C(jT_s)\Delta Q(jT_s)}{\sum_{j=0}^N \Delta Q^2(jT_s)},$$

где $\Delta Q(jT_s)$ – текущие значения показаний регистратора измерителя расхода отбираемого дистиллята; $\Delta C(jT_s)$ – текущие значения концентрации сырья в линии питания с регистратора показаний промышленного хроматографа; T_s – длина циклограммы хроматографа, мин; $K_{др}(NT_s)$ – количественная оценка скорости дрейфа критерия управления (зависимость текущих потерь сырья от расхода отбираемого дистиллята); N – длина массивов накапливаемой информации.

Результаты исследований

Исследование метрологических характеристик процессов адаптивного управления при количественной оценке эффективности сложных теплотехнических объектов возможно только методами имитационного моделирования [4].

На рис. 3 представлена блок-схема имитации процессов управления в ректификационной колонне тарельчатого типа по алгоритму, представленному в [3]. На рис. 3 приняты следующие обозначения: $X_1(iT_s)$, $X_2(iT_s)$, $X_3(iT_s)$, $X_4(iT_s)$ – расходы перегретого пара,

хладагента, дистиллята и питающей смеси соответственно; $Y_1(iT_s)$, $Y_2(iT_s)$, $Y_3(iT_s)$, $Y_5(iT_s)$, $Y_7(iT_s)$, $Y_8(iT_s)$ – температуры низа колонны, 16-й, 22-й, 28-й (тарелка питания), 37-й тарелок и верха колонны соответственно; $Y_4(iT_s)$ – температура тарелки питания (со стороны исчерпываемой части); $Y_6(iT_s)$ – температура тарелки питания (со стороны укрепляющей части); $Y_9(iT_s)$ – температура питающей смеси со стороны химического реактора и блока идентификации; $Y_{10}(iT_s)$ – температура на выходе химического реактора; $Y_{1зад}(iT_s)$ – заданная температура куба колонны; $Y_{8зад}(iT_s)$ – заданная температура верха колонны; $Z_3(jT_s)$ – концентрация изобутана в питающей смеси; $Z_{3зад}(jT_s)$ – заданная концентрация изобутана в питающей смеси (по регламенту); $Z_4(jT_s)$ – концентрация метилтетрабутилового эфира (МТБЭ) в питающей смеси; $Z_7(jT_s)$ – концентрация изобутана на выходе компенсатора (прогноз по модели компенсатора); $Z_9(jT_s)$ – концентрация изобутана по модели колонны; $Z_8(jT_s)$ – концентрация МТБЭ по модели колонны; $Z_6(jT_s)$ – концентрация МТБЭ, измеренная хроматографом; $\text{ЭР1}(jT_s)$, $\text{ЭР2}(jT_s)$ – значения эффективности работы верхней и нижней частей ректификационной установки; $\Delta J_b(jT_s)$ – критерий качества управления верхней частью колонны.

Блок-схема включает в себя: модель температурного профиля исчерпываемой части колонны (блоки 1-3); модель укрепляющей части колонны (блоки 4, 5); модель управления колонной по каналу «концентрация изобутана в верхней части колонны – температура верха» (блок 14 и [1]); модель управления колонной по каналу «концентрация МТБЭ в нижней части колонны – температура куба» (блок 9 и [1]); модель имитации температуры на выходе химического реактора [1]; модель формирования температуры тарелки питания (блок 6 и [1]); модель имитации процесса регулирования температуры питания; алгоритм вычисления критерия качества управления верхней частью колонны 13; алгоритм вычисления эффективности работы (блоки 10, 16). К выходному сигналу температуры тарелки питания аддитивно приложены сигналы помехи и дрейфа (блоки 7 и 15). Блок-схема содержит также блоки моделирования стационарных и нестационарных сигналов параметров, таких как концентрации изобутана и целевого продукта в питающей смеси, концентрация изобутана в дистилляте, концентрация целевого продукта, расходы перегретого пара, хладагента, дистиллята, питающей смеси [1]. Наличие блоков управления: 17 (робастной стабилизации низа колонны – БРСНК), 18 (адаптивного управления верхней точкой температурного профиля – БАУВТТП) и 19 (адаптивного управления верхней частью колонны – БАУВК) – позволяют провести имитацию процессов управления в условиях, наиболее приближенных к реальным, то есть в условиях действия помех измерения и дрейфа характеристик ректификационной колонны [1]. Например, БАУВТТП рассчитывает, как температура верха колонны $Y_8(jT_s)$ (после блока 4) после-



довательно проходит через блоки 5, 6, представляющие собой модель укрепляющей части колонны, и определяет температурный профиль укрепляющей части колонны.

В блоке 6 происходит формирование температуры тарелки питания $Y_5(jT_S)$ как среднего значения между температурой паров, поступающих на тарелку питания снизу $Y_4(jT_S)$, температурой жидкости, поступающей на тарелку питания сверху, $Y_7(jT_S)$, и температурой смеси, приходящей из химического реактора, $Y_9(jT_S)$. Температура $Y_9(jT_S)$, помимо вклада химического реактора в формирование температуры тарелки питания, включает в себя также составляющую, образуемую блоком идентификации [4]. Текущие значения концентраций изобутана в дистилляте $Z_5(jT_S)$ и МТБЭ в целевом продукте $Z_6(jT_S)$ поступают на блоки вычисления эффективности работы верхней и нижней частей колонны. В результате обработки полученных данных на выходе блоков 16 и 10 формируются значения $\mathcal{E}P1(jT_S)$ и $\mathcal{E}P2(jT_S)$. Концентрация изобутана в питающей смеси $Z_3(jT_S)$ следует на блок компенсации возмущений 12, на выходе которого формируются два сигнала – температуры верха $Y_{8зад}(jT_S)$, поступающей на БАУВТТП, и концентрации изобутана в дистилляте $Z_7(jT_S)$, идущей на блок вычисления критерия качества управления 13. На блок 13 одновременно поступают сигналы расходов дистиллята $X_3(jT_S)$ и питающей смеси $X_4(jT_S)$. В результате обработки поступивших значений указанных выше параметров осуществляется прогноз потерь сырья $\Delta J_B(jT_S)$. Блок 19 (БАУВК) представляет собой локальную одноконтурную систему регулирования расхода флегмы с заданием в виде отклонения прогнозируемой концентрации изобутана в дистилляте, $Z_7(jT_S)$, от заданной (блок 6). Движение в сторону достижения экстремума осуществляется посредством метода градиентного поиска [1, 3].

мируются значения $\mathcal{E}P1(jT_S)$ и $\mathcal{E}P2(jT_S)$. Концентрация изобутана в питающей смеси $Z_3(jT_S)$ следует на блок компенсации возмущений 12, на выходе которого формируются два сигнала – температуры верха $Y_{8зад}(jT_S)$, поступающей на БАУВТТП, и концентрации изобутана в дистилляте $Z_7(jT_S)$, идущей на блок вычисления критерия качества управления 13. На блок 13 одновременно поступают сигналы расходов дистиллята $X_3(jT_S)$ и питающей смеси $X_4(jT_S)$. В результате обработки поступивших значений указанных выше параметров осуществляется прогноз потерь сырья $\Delta J_B(jT_S)$. Блок 19 (БАУВК) представляет собой локальную одноконтурную систему регулирования расхода флегмы с заданием в виде отклонения прогнозируемой концентрации изобутана в дистилляте, $Z_7(jT_S)$, от заданной (блок 6). Движение в сторону достижения экстремума осуществляется посредством метода градиентного поиска [1, 3].

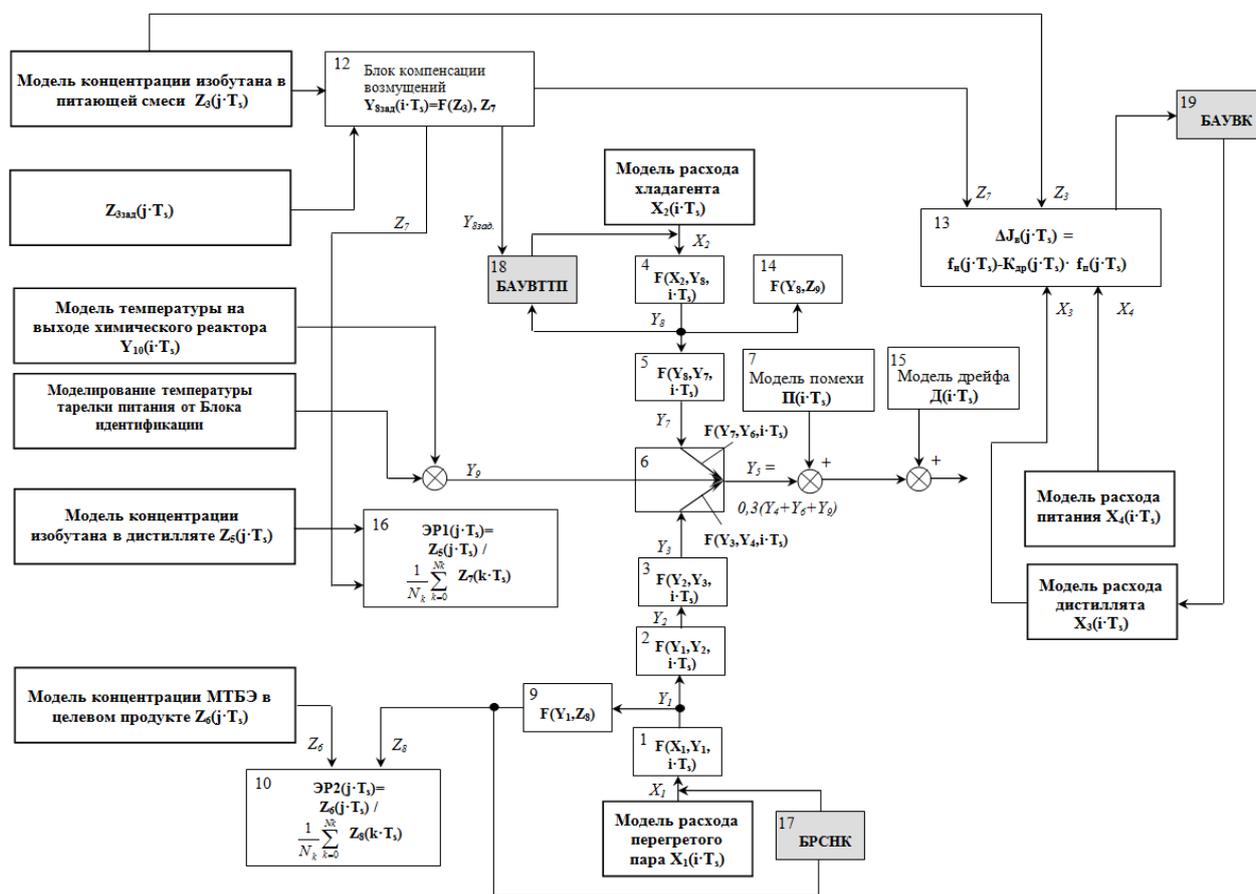


Рис. 3. Блок-схема программы имитационного моделирования процессов управления
 Fig. 3. Block diagram of the program of simulation of control processes

На рис. 4 показан переходный процесс на тарелке питания, полученный имитационным моделированием. Из рис. 4 видно, что отклонение моделируемой последовательности от заданного по технологическому регламенту значения режимного параметра – температуры питающей смеси – не превышает 5%.

В ходе исследования было выявлено (рис. 5 и [1]), что каждому текущему значению коэффициента дрейфа $K_{др}(jT_S)$ соответствует определенный расход дистиллята $X_3(jT_S)$ на соответствующем периоде управления.



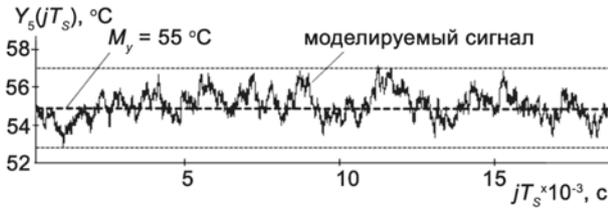


Рис. 4. Имитация текущих значений температуры тарелки питания
 Fig. 4. Simulated current values of the temperature of the plate supply

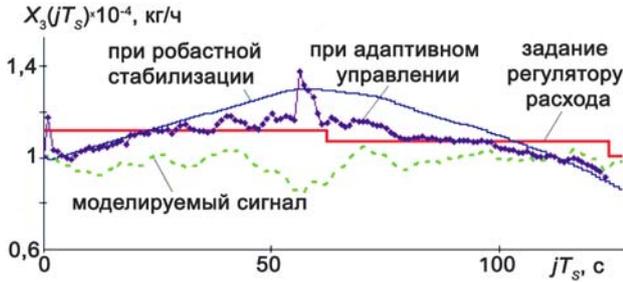


Рис. 5. Тренды текущих значений управляющего воздействия
 Fig. 5. Trends of the current values of the control action

При этом текущие значения коэффициента дрейфа колеблются относительно выбранной стратегии изменения (рис. 6). Прямая соответствует заданному значению коэффициента дрейфа [1], а зависимость $K_{др}^M$ определяет моделируемую последовательность.

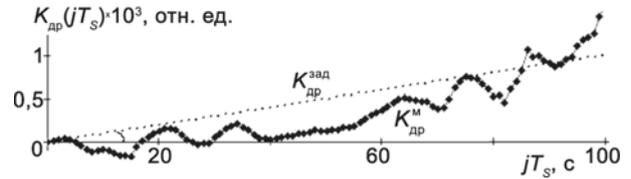


Рис. 6. Тренд текущих значений коэффициента дрейфа
 Fig. 6. The trend of the current values of coefficient drift

На рис. 7 представлена мнемосхема автоматизированного рабочего места (АРМ) для управления процессом ректификации. На экране «Окно главного оператора-технолога» показано наиболее важное технологическое оборудование с основными функциональными связями. Из рис. 7 видно, что также предусмотрен контроль основных режимных параметров процесса ректификации, реализованный посредством вывода текущих значений параметров в специальные области («ячейки»).

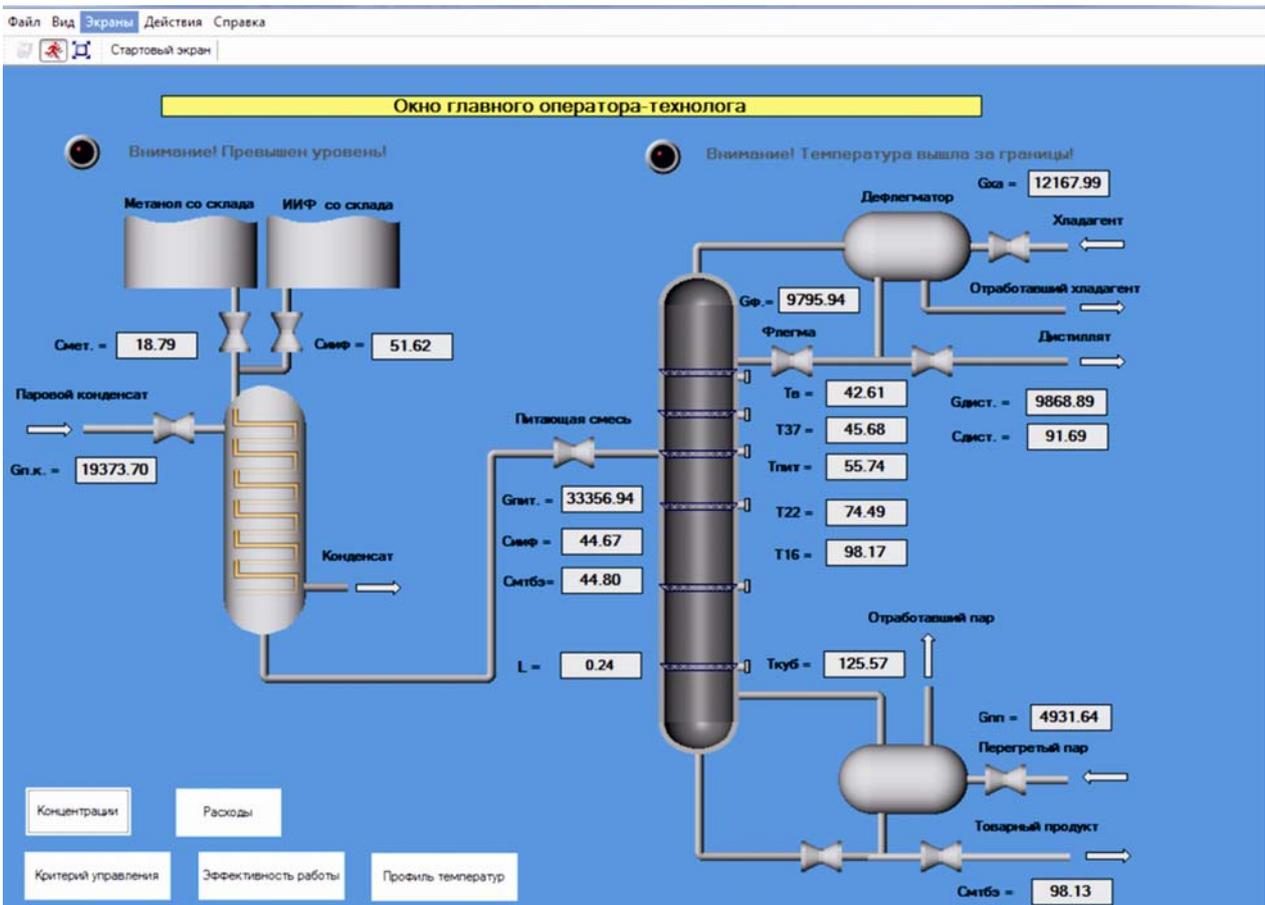


Рис. 7. Главное окно ППП «Адаптивное управление процессом ректификации» [1]
 Fig. 7. The main window of the SPT "Adaptive control rectification process" [1]

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Представлены индикаторы световой сигнализации превышения уровня кубового остатка в колонне и выхода температуры за допустимые границы. В случае аварии клапаны перекрываются и реагенты перестают поступать внутрь колонны. Предусмотрена возможность защиты от несанкционированного доступа. Здесь же предусмотрены кнопки перехода на другие экраны. На экране «Концентрации» [1] визуализируются случайные сигналы концентраций изобутана и метилтетрабутилового эфира (МТБЭ) в шихте и в питающей смеси, изобутана в дистилляте и МТБЭ в товарном продукте. На экране «Потери сырья» [1] представлены тренды зависимости потерь сырья от времени.

Заключение

Анализ технологического процесса ректификации на примере синтеза метилтетрабутилового эфира показал, что показатели качества работы ректификационной установки напрямую зависят от текущего значения потерь сырья, которые предлагается оценивать разностью текущего значения концентрации изобутана, поступающего на тарелку питания и текущего значения концентрации изобутана, отводимого с потоком дистиллята на интервале одной циклограммы промышленного хроматографа. Эффективность работы ректификационной колонны предлагается оценивать по критерию минимума суммарных потерь сырья на интервале времени: NT_S , где N – длина массива накапливаемой информации; T_S – время одного измерения концентрации промышленным хроматографом [1]. При этом адаптивное управление верхней точкой температурного профиля реализуется за счет применения каскадно-комбинированной системы регулирования расхода флегмы,

изменяемого в зависимости от текущего значения потерь сырья [3].

С течением времени накопления информации, необходимой для идентификации, в результате воздействия дрейфа, оптимальный режим «уплывает», при этом потери при управлении возрастают (см. рис. 5). Таким образом, необходим компромисс между увеличением объема выборки, N , и скоростью дрейфа, $K_{др}(jT_S)$. Искомый компромисс и обеспечивает оптимальный режим функционирования алгоритма управления, при котором достигаются минимальные потери сырья. Компромиссное время накопления информации для рассматриваемого объекта управления достигается при накоплении 63 измерений, произведенных хроматографом.

В результате исследования на имитационной модели (см. рис. 5) установлено, что при накоплении 63 значений хроматографа жесткая стабилизация приводит к сокращению потерь на 27% в сравнении с этим же показателем без управления. Адаптивное управление позволяет снизить потери сырья на 14% в сравнении с этим же показателем при робастной стабилизации. Таким образом, в рассматриваемом процессе применение алгоритмов адаптивного управления эффективно. Применение системы адаптивного управления позволяет повысить уровень интеллекта всей системы управления, что приведет к повышению надежности и работоспособности за счет исключения человеческого фактора. Разработанный в работе [1] пакет прикладных программ положен в основу стенда-тренажера для подготовки аппаратчиков, что ведет к повышению качества получаемого продукта, ускоренному развитию предприятия и, как следствие, улучшению материального и социального положения обслуживающего персонала.

Список литературы

1. Шаровина С.О. Адаптивное управление температурным профилем ректификационной колонны тарельчатого типа // Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06. МЭИ, 2014.
2. Шевчук В.П., Шаровина С.О. Способ автоматического управления температурным профилем теплотехнического объекта // Альтернативная энергетика и экология – ISJAEЕ. 2013. № 16. С. 107-110.
3. Патент на изобретение № 2509593. Способ автоматического управления процессом ректификации и устройство для его осуществления / В.П. Шевчук, С.А. Агринская, С.О. Шаровина // Бюл. № 8 от 20.03.2014.
4. Шевчук В.П. Моделирование метрологических характеристик интеллектуальных измерительных приборов и систем. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011.

References

1. Šarovina S.O. Adaptivnoe upravlenie temperaturnym profilom rektifikacionnoj kolonny tarel'čatogo tipa // Avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk: 05.13.06. MĖI, 2014.
2. Ševčuk V.P., Šarovina S.O. Sposob avtomatičeskogo upravleniâ temperaturnym profilom teplotehničeskogo ob'ekta // Al'ternativnaâ ènergetika i èkologiâ – ISJAEЕ. 2013. № 16. S. 107-110.
3. Patent na izobretenie № 2509593. Sposob avtomatičeskogo upravleniâ processom rektifikacii i ustrojstvo dlâ ego osuŝestvleniâ / V.P. Ševčuk, S.A. Agrinskaâ, S.O. Šarovina // Bûl. № 8 ot 20.03.2014.
4. Ševčuk V.P. Modelirovanie metrologičeskikh harakteristik intellektual'nyh izmeritel'nyh priborov i sistem. M.: FIZMATLIT, 2011.

Транслитерация по ISO 9:1995

