

---

---

# ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

№ 12 2015  
Часть 4  
ISSN 1812-7339

---

---

Журнал издается с 2003 г.

Электронная версия: <http://fundamental-research.ru>

Правила для авторов: <http://fundamental-research.ru/ru/rules/index>

Подписной индекс по каталогу «Роспечать» – 33297

**Главный редактор**

*Ледванов Михаил Юрьевич, д.м.н., профессор*

**Зам. главного редактора**

*Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н., профессор*

**Ответственный секретарь редакции**

*Бизенкова Мария Николаевна*

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

д.т.н., проф. Бошенятов Б.В. (Москва); д.т.н., проф. Важенин А.Н. (Нижний Новгород); д.т.н., проф. Гилёв А.В. (Красноярск); д.т.н., проф. Гоц А.Н. (Владимир); д.т.н., проф. Грызлов В.С. (Череповец); д.т.н., проф. Захарченко В.Д. (Волгоград); д.т.н. Лубенцов В.Ф. (Ульяновск); д.т.н., проф. Мадера А.Г. (Москва); д.т.н., проф. Пачурин Г.В. (Нижний Новгород); д.т.н., проф. Пен Р.З. (Красноярск); д.т.н., проф. Петров М.Н. (Красноярск); д.т.н., к.ф.-м.н., проф. Мишин В.М. (Пятигорск); д.э.н., проф. Савон Д.Ю. (Ростов-на-Дону); д.э.н., проф. Макринова Е.И. (Белгород); д.э.н., проф. Роздольская И.В. (Белгород); д.э.н., проф. Коваленко Е.Г. (Саранск); д.э.н., проф. Зарецкий А.Д. (Краснодар); д.э.н., проф. Тяглов С.Г. (Ростов-на-Дону); д.э.н., проф. Титов В.А. (Москва); д.э.н., проф. Серебрякова Т.Ю. (Чебоксары)

---

Журнал «Фундаментальные исследования» зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия. **Свидетельство – ПИ № 77-15598.**

Все публикации рецензируются.  
Доступ к журналу бесплатен.

Журнал представлен в **Научной электронной библиотеке (НЭБ)** – головном исполнителе проекта по созданию Российского индекса научного цитирования (РИНЦ). Место в общем рейтинге **SCIENCE INDEX за 2013 год – 207** (из 3009 индексируемых РИНЦ журналов).

Журнал включен в **«Перечень рецензируемых научных изданий»**, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук».

---

Ответственный секретарь редакции –  
*Бизенкова Мария Николаевна* – +7 (499) 705-72-30  
E-mail: **edu@rae.ru**  
Почтовый адрес  
г. Москва, 105037, а/я 47 АКАДЕМИЯ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ,  
редакция журнала «ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ»  
Учредитель – МОО «Академия Естествознания»  
Издательство и редакция: Издательский Дом «Академия Естествознания»  
Типография ИД «Академия Естествознания», г. Саратов, ул. Мамантовой, 5

Подписано в печать 07.12.2015  
Формат 60х90 1/8  
Технический редактор Кулакова Г.А.  
Корректор Галенкина Е.С.  
Усл. печ. л. 26,88.  
Тираж 1000 экз. Заказ ФИ 2015/12

## СОДЕРЖАНИЕ

**Технические науки (05.02.00, 05.13.00, 05.17.00, 05.23.00)**

РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНЫХ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ СРЕДЫ ОБУЧЕНИЯ <i>Архипов В.Ю., Тарасенко Н.А., Лобанов В.Г., Тимофеев Т.И.</i> .....	661
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ ДИНАМИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ЛЕГКОГО КОММЕРЧЕСКОГО АВТОМОБИЛЯ НА БЕЗОПАСНОСТЬ КРИВОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ <i>Вашиурин А.С., Мошков П.С., Трусев Ю.П., Торопов Е.И., Тумасов А.В.</i> .....	665
СИНТЕЗ ЭМПИРИЧЕСКИХ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ НА ОСНОВЕ МАТЕРИАЛОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАТУРНО-МОДЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ <i>Гречихин В.В., Краевский И.С., Лозин О.И., Шайхутдинов Д.В., Январев С.Г.</i> .....	671
СИНТЕЗ ГИБРИДНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ ПЛАНИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ <i>Даринцев О.В., Мигранов А.Б.</i> .....	676
ВЫБОР КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ МЕХАНИЗМА ОПТИЧЕСКОГО КОММУТАТОРА <i>Егоров И.Н., Кобзев А.А., Потанин Ю.С., Шевцов Д.С.</i> .....	682
РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ РЕКОМЕНДАЦИЙ ДЛЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ КОРПОРАТИВНОГО ПОРТАЛА УНИВЕРСИТЕТА <i>Ефимов М.Н., Шлей М.Д., Вареников Д.А.</i> .....	688
ЭЛЕКТРОМОБИЛЬ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕГО РАЗВИТИЯ <i>Карамян О.Ю., Чебанов К.А., Соловьева Ж.А.</i> .....	693
СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНОЙ РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННОЙ ДЛЯ МАКСИМИЗАЦИИ ОТБОРА ЭТИЛЕНА <i>Кривошеев В.П., Колобенков Д.А., Ануфриев А.В.</i> .....	697
АНАЛИЗ НОРМАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ПЛОЩАДКАХ КОНТАКТА ЗВЕНЬЕВ МЕХАНИЗМОВ С ЗСТК ПРИ ВЕДУЩЕМ ВНУТРЕННЕМ КОЛЬЦЕ И ВВОДЕ ПОПРАВКИ ПО РАДИУСУ ЭТОГО ЖЕ ЗВЕНА <i>Мерко М.А., Меснянкин М.В., Кайзер Ю.Ф., Мерко И.С., Лысянников А.В., Колотов А.В., Митяев А.Е., Лысянникова Н.Н., Рабецкая О.И., Мерко А.М.</i> .....	702
СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АДАПТИВНЫМ СБОРОЧНЫМ РОБОТОМ С МОДЕЛЬЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА <i>Мишулин Ю.Е., Егоров И.Н., Буненков В.В.</i> .....	707
ПРОЧНОСТЬ НА СЖАТИЕ ПРЕССОВОК ИЗ ВАНАДИЙСОДЕРЖАЩЕГО ПОРОШКА ЖЕЛЕЗА С МАЛЫМИ ЛЕГИРУЮЩИМИ ДОБАВКАМИ <i>Поляков П.А., Долматов А.В., Поляков А.П.</i> .....	713
ЛОКАЛИЗАЦИЯ ЭКСТРЕМУМОВ И НУЛЕЙ ФУНКЦИЙ НА ОСНОВЕ СОРТИРОВКИ В ПРИЛОЖЕНИИ К АНАЛИЗУ УСТОЙЧИВОСТИ <i>Ромм Я.Е., Заика И.В., Тюшнякова И.А.</i> .....	718
МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА МНОГОЯЗЫКОВОГО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ПОИСКА С УЧЕТОМ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ <i>Шоуман М.А.</i> .....	724

УДК 330.46:661

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНОЙ РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННОЙ ДЛЯ МАКСИМИЗАЦИИ ОТБОРА ЭТИЛЕНА

<sup>1</sup>Кривошеев В.П., <sup>2</sup>Колобенков Д.А., <sup>2</sup>Ануфриев А.В.

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Владивостокский государственный университет экономики и сервиса»,  
Владивосток, e-mail: vladimir.krivosheev@vvsu.ru;

<sup>2</sup>ФГАУ ВПО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток,  
e-mail: kolobenzov\_da@dvfu.ru, anufriev.av@dvfu.ru

В работе рассматривается синтез системы управления сложной ректификационной колонной для выделения этилена высокой чистоты. На основе статических режимов колонны, обеспечивающих максимизацию отбора этилена требуемого качества, определена структура системы управления с контурами, включающими комбинированную систему регулирования температуры на контрольной тарелке ректификационной колонны и инвариантную систему воздействия на температуру на контрольной тарелке изменением отбора продуктового потока. По выбранным каналам передачи воздействий в объекте управления на основе переходных функций получены передаточные функции. Выполнен синтез компенсаторов и параметрический синтез регуляторов. Приведены графики переходных процессов в системе оптимального управления колонной и в системе поддержания температуры на контрольной тарелке при выполнении условия оптимального статического режима без динамической компенсации возмущения в колонну по расходу сырья.

**Ключевые слова:** ректификационная колонна, максимизация отбора этилена, параметрический синтез, передаточная функция, компенсатор

## THE CONTROL SYSTEM OF COMPLICATED DISTILLATION COLUMN FOR MAXIMIZATION OF PRODUCT ETHYLENE

<sup>1</sup>Krivosheev V.P., <sup>2</sup>Kolobenzov D.A., <sup>2</sup>Anufriev A.V.

<sup>1</sup>Vladivostok State University of Economics and Service, Vladivostok,  
e-mail: vladimir.krivosheev@vvsu.ru;

<sup>2</sup>Far Eastern Federal University, Vladivostok, e-mail: kolobenzov\_da@dvfu.ru, anufriev.av@dvfu.ru

This paper deals with the synthesis of control system of complicated distillation column for the separation of high purity ethylene. On the basis of static column mode providing maximization of ethylene selection of the required quality the structure of the control system with loops, including a combined temperature control system on the control plate in fractionation column and invariant system of influence on temperature on the control plate through changing selection of product flow, is determined. According to the selected transmission channels in the control object transfer functions on the basis of transition functions are obtained. The synthesis of compensators and parametric synthesis of regulators are executed. Transient processes graphs in the optimal control system of column and system of keeping temperature on the control plate under the condition of optimal static mode without dynamic compensation of disturbance in the column on the flow rate of raw materials are given.

**Keywords:** distillation column, picking of product ethylene, parametric synthesis, transfer function, compensator

Этилен входит в число основных крупнотоннажных продуктов органического синтеза и составляет 30% в составе всех процессов органического синтеза. Повышение эффективности процессов получения товарного этилена достигается как за счёт новых технологических решений, так и за счёт оптимального управления этими процессами. Синтез систем оптимизации процессов получения этилена в связи с изложенным является актуальным.

Целью данной работы является синтез системы управления, обеспечивающей максимизацию отбора товарного этилена в сложной ректификационной колонне. При этом разрабатывается структура системы управления оптимальными режимами с выделением контура комбинированного управления температурой на контрольной

тарелке и контура инвариантности температуры на контрольной тарелке от отбора продуктового потока, определяются передаточные функции колонны и регулирующих устройств в указанных контурах, строятся переходные процессы в системе управления колонной без компенсации возмущений и в системе оптимального управления.

Схема исследуемой колонны приведена на рис. 1. Её статические характеристики рассмотрены в работе [1].

Питающая смесь, нагретая до температуры кипения, подается на 51 тарелку. Дистиллят (D) выводится из конденсатора в виде паровой фазы. Товарный этилен (A) выводится из колонны верхним боковым погоном со 197 тарелки. Нижний боковой погон (B) отбирается с 37 тарелки, первая часть этого потока выводится из колонны,

а вторая часть ( $L$ ) нагревается верхним боковым ребойлером ( $Q_L$ ) и возвращается обратно в колонну на 36 тарелку (верхнее ЦО). Нижнее ЦО ( $M$ ) отбирается с 24, нагревается нижним боковым ребойлером  $Q_M$  и подается на 23 тарелку. Кубовый остаток ( $W$ ) отводится снизу колонны. Нумерация тарелок ведется снизу.

ЭРК: расход сырья – температура на контрольной тарелке ( $F - T_{КТ}$ ), расход греющего пара (тепловая нагрузка) – температура на контрольной тарелке ( $Q_W - T_{КТ}$ ), расход продуктового потока – температура на контрольной тарелке ( $A - T_{КТ}$ ). Системы стабилизации при этом были включены.

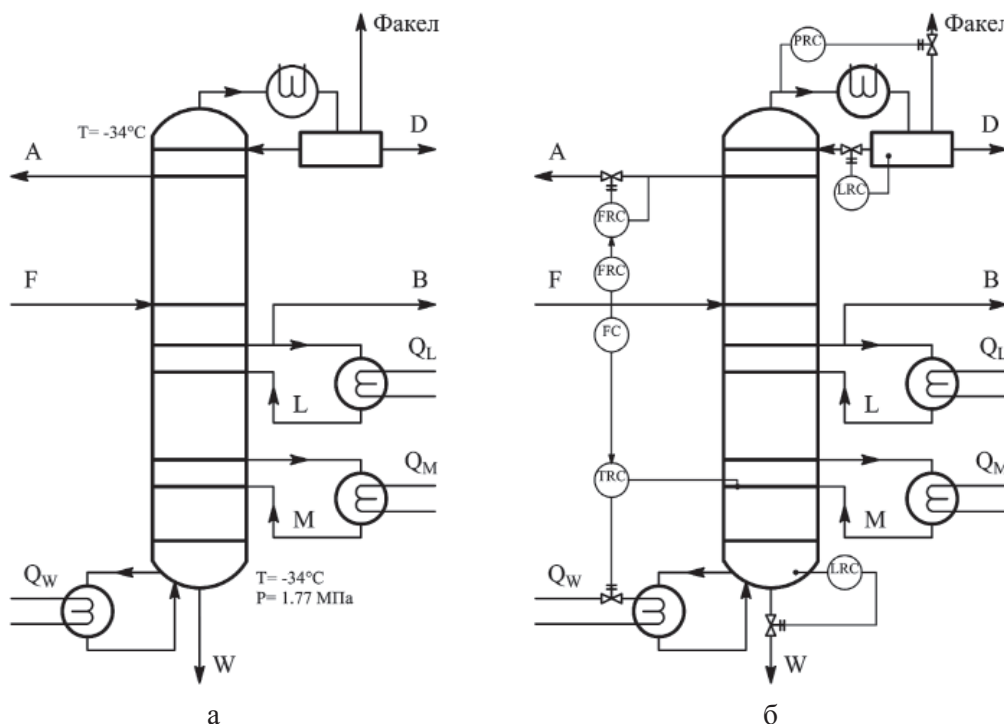


Рис. 1. Технологическая (а) и функциональная (б) схемы этиленовой ректификационной колонны

В результате моделирования найдена контрольная (23) тарелка и в статических режимах максимального отбора этилена заданного качества установлены: зависимость изменения температуры на контрольной тарелке от изменения расхода питания в колонну

$$\Delta T_{КТ} = f_T(F) = 0,0265 \cdot \Delta F$$

и зависимость изменения расхода продуктового этилена от изменения расхода питания в колонну

$$\Delta A = f_A(F) = 0,8583 \cdot \Delta F.$$

В работах [3, 4] с использованием аналитических моделей динамики получены оптимальные настроечные параметры ПИ-регуляторов систем стабилизации уровня во флегмовой емкости, давления в колонне и уровня в ребойлере. В работе [2] приведены переходные функции по различным каналам передачи воздействий

### Структурный и параметрический синтез системы регулирования оптимальной температуры на контрольной тарелке

Функциональная схема системы управления колонной представлена на рис. 1, б. Задача управления решается компенсаторами верхнего FRC и нижнего FC и TRC контуров. По информации о расходе питания компенсатором FRC формируется сигнал задания на оптимальный отбор продуктового этилена. Компенсатором FC формируется оптимальное задание регулятору температуры на контрольной тарелке при изменении расхода питания.

Для подтверждения эффективности системы регулирования температуры на контрольной тарелке с динамической компенсацией возмущения по расходу сырья рассматривается система регулирования температуры на контрольной тарелке без динамической компенсации возмущения. Структурные схемы указанных систем регулирования приведены на рис. 2.

Передаточные функции, необходимые для расчета компенсаторов, получены с использованием метода площадей Симоу [6] из переходных функций колонны, приведенных в работе [2]. Передаточные функ-

ции, полученные в данной работе, сведены в таблице. Реализация системы управления предполагается на регулирующем микропроцессорном контроллере с токовыми сигналами в мА.

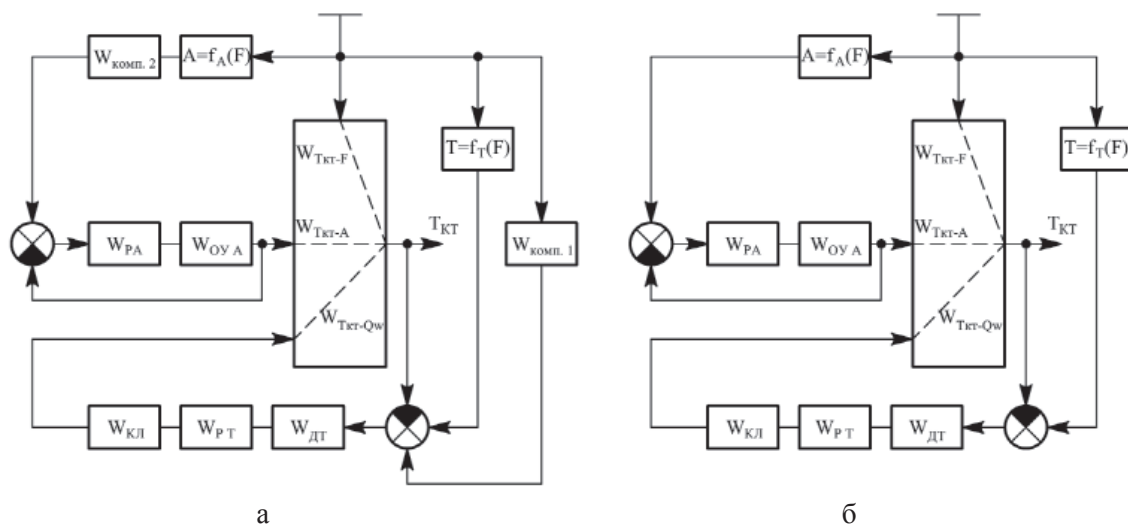


Рис. 2. Структурные схемы регулирования температуры на контрольной тарелке с динамической компенсацией возмущения по расходу сырья (а) и без динамической компенсации (б)

#### Передаточные функции исследуемой колонны

Канал прохождения сигнала	Выражение передаточной функции
Расход сырья – температура на контрольной тарелке ( $F - T_{\text{КТ}}$ )	$W_{T_{\text{КТ}}-F}(S) = -0,2256 \frac{1}{5,8967S + 1}, \left[ \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{т/ч}} \right]$
Расход греющего пара – температура на контрольной тарелке ( $Q_w - T_{\text{КТ}}$ )	$W_{T_{\text{КТ}}-Q}(S) = 0,03907 \frac{1}{3,65199S + 1}, \left[ \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{кВт}} \right]$
Расход продуктового потока – температура на контрольной тарелке ( $A - T_{\text{КТ}}$ )	$W_{T_{\text{КТ}}-A}(S) = 0,33701 \frac{1}{12,4041S + 1}, \left[ \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{т/ч}} \right]$
Система регулирования расхода продуктового потока	$W_{\text{СРА}}(s) = 1, \left[ \frac{\text{т/ч}}{\text{т/ч}} \right]$
Измеритель температуры	$W_{\text{ДТ}}(s) = 1, \left[ \frac{\text{мА}}{^{\circ}\text{C}} \right]$
Клапан на линии греющего пара	$W_{\text{КЛ}}(s) = 11,24, \left[ \frac{\text{т/ч}}{\text{мА}} \right]$
Регулятор температуры	$W_{\text{РТ}}(s) = 15,91 + \frac{2,3}{s}, \left[ \frac{\text{мА}}{\text{мА}} \right]$

Параметрический синтез комбинированной системы управления выполнялся с использованием программного обеспечения [5]. Для параметрического синтеза компенсаторов выделим из общей схемы системы управления контур регулирования подачи тепла в куб колонны (контур 1) с передаточной функцией компенсатора  $W_{\text{комп.1}}(s)$

(рис. 3, а) и контур регулирования отвода продуктового этилена (контур 2) с передаточной функцией  $W_{\text{комп.2}}(s)$  (рис. 3, б). В связи с малой инерционностью контура стабилизации расхода продуктового потока (рис. 1, б) передаточная функция замкнутой системы стабилизации этого параметра принималась равной единице (рис. 3, б).

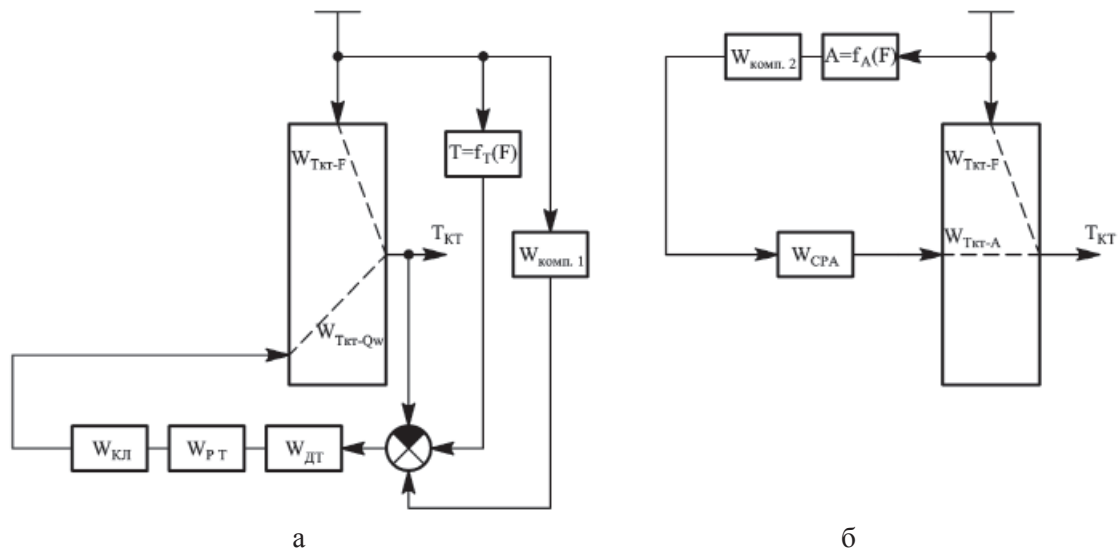


Рис. 3. Структурные схемы контура комбинированного регулирования подачи тепла в куб колонны (а) и контура инвариантности воздействию на отбор продуктового потока (б)

Передаточная функция компенсатора 1 в динамике из условия инвариантности имеет вид

$$W_{\text{комп.1}}(s) = -\frac{W_{T_{\text{кт}}-F}}{W_{T_{\text{кт}}-Q} \cdot W_{\text{РТ}} \cdot W_{\text{ДТ}} \cdot W_{\text{КЛ}}};$$

$$W_{\text{комп.1}}(s) = \frac{0,8239s^2 + 0,2256s}{41,1990s^2 + 12,8800s + 1,0100}.$$

Передаточная функция для компенсатора второго контура с учетом выполнения условия инвариантности имеет вид

$$W_{\text{комп.2}} = -\frac{W_{T_{\text{кт}}-F}}{W_{T_{\text{кт}}-A} \cdot f(A)};$$

$$W_{\text{комп.2}} = \frac{2,7984s + 0,2256}{1,7053s + 0,2892}.$$

Для моделирования переходных процессов в системе управления пользовались программой Simulink [7]. Схема моделирования системы регулирования температуры на контрольной тарелке с динамической компенсацией возмущения по расходу сырья изображена на рис. 4.

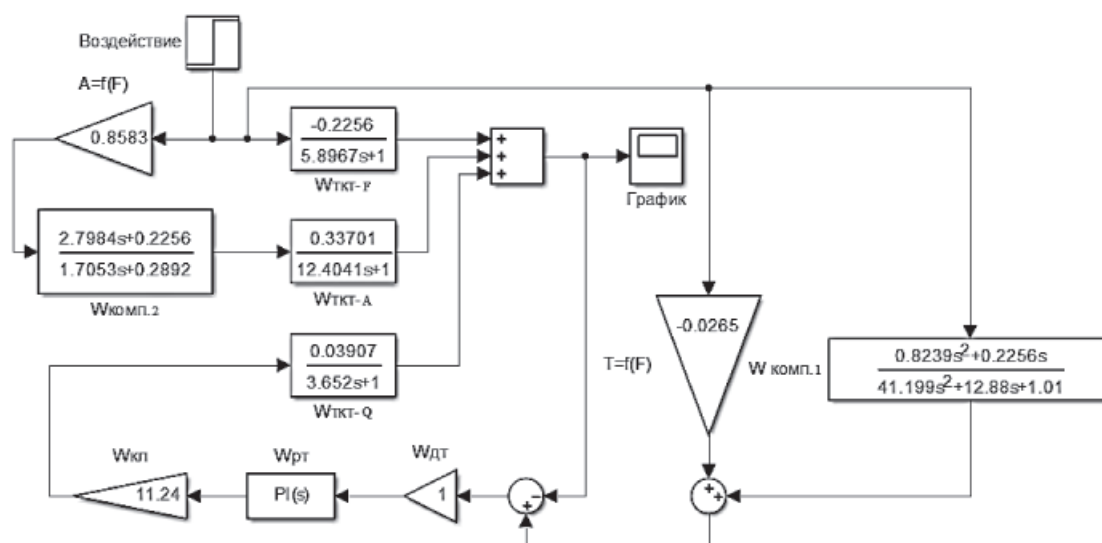


Рис. 4. Схема моделирования системы регулирования температуры на контрольной тарелке с динамической компенсацией возмущения по расходу сырья



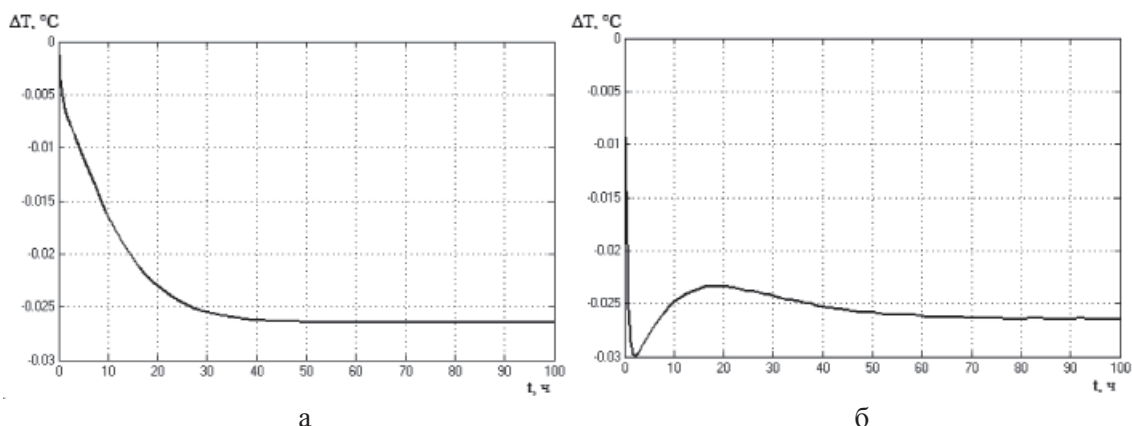


Рис. 5. Переходные процессы в системе регулирования температуры на контрольной тарелке с динамической компенсацией возмущения по расходу сырья (а) и без динамической компенсации (б)

Полученные переходные процессы при единичном ступенчатом воздействии по расходу сырья представлены на рис. 5. Из рис. 5 следует, что переходной процесс в общей системе регулирования температуры на контрольной тарелке с компенсаторами занимает меньше времени, чем без компенсаторов. Применение компенсаторов значительно сокращает время переходного процесса.

#### Заключение

На основе переходных функций получены передаточные функции сложной этиленовой ректификационной колонны по основным каналам передачи воздействий. Определена структура и выполнен параметрический синтез системы максимизации отбора товарного продукта. Смоделированы переходные процессы в системе регулирования температуры на контрольной тарелке с динамической компенсацией возмущения по расходу сырья и без динамической компенсации. Показано, что время переходного процесса в предложенной системе с компенсацией возмущений сократилось значительно по сравнению с системой без компенсации возмущений.

#### Список литературы

1. Кривошеев В.П. Исследование оптимальных статических режимов сложной ректификационной колонны для получения этилена // Современные проблемы науки и образования – 2013. – № 6 – URL: [www.science-education.ru/113-11210](http://www.science-education.ru/113-11210) (дата обращения: 21.10.07).
2. Кривошеев В.П. Моделирование динамических характеристик сложных объектов управления на примере этиленовой ректификационной колонны // сб. статей V международной заочной научно-технической конференции. Ч. 1 – Тольятти: Изд-во: ПВГУС, 2015. – С. 324–330.
3. Кривошеев В.П. Параметрический синтез системы стабилизации давления на основе аналитической модели объекта // Междисциплинарные исследования в области математического моделирования и информатики. – Ульяновск: SIMJET, 2015. – С. 212–217.
4. Кривошеев В.П. Параметрический синтез системы стабилизации уровня на основе аналитической модели объекта // Междисциплинарные исследования в области мате-

матического моделирования и информатики. – Ульяновск: SIMJET, 2015. – С. 217–223.

5. Свидетельство 2009616229 Российская Федерация. Расчёт комбинированных систем ("РКоС"): свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ / Кривошеев В.П., Сачко М.А.; зарегистр. в Реестре программ для ЭВМ 11.11.2009

6. Стефани Е.П. Основы настройки регуляторов тепловых энергетических процессов. – М.: Энергия, 1972. – 376 с.

7. Simulink – моделирование и и симуляция динамических систем для Simulink [Электронный ресурс] / Разработчик: MathWorks company – Режим доступа: <http://matlab.ru/products/simulink>, свободный. – Загл. с экрана. – Рус. англ.

#### References

1. Krivosheev V. P., Nikiforova K. E., Anufriev A. V., Kan B. A., Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya, 2013, Vol 6, URL: [www.science-education.ru/113-11210](http://www.science-education.ru/113-11210).
2. Krivosheev V.P., Kolobjonkov D.A., Tereshhenko N.V., Anufriev A.V., sb. statej V mezhdunarodnoj zaочноj nauchno-tehnicheskoy konferencii. Ch. 1, Tolyatti, PVGUS, 2015, pp. 324–330.
3. Krivosheev V.P., Kolobjonkov D.A., Tereshhenko N.V., Anufriev A.V., Mezhdisciplinarnye issledovaniya v oblasti matematicheskogo modelirovaniya i in-formatiki, Ulyanovsk, SIMJET, 2015, pp. 212–217.
4. Krivosheev V.P., Kolobjonkov D.A., Tereshhenko N.V., Anufriev A.V., Mezhdisciplinarnye issledovaniya v oblasti matematicheskogo modelirovaniya i in-formatiki, Ulyanovsk, SIMJET, 2015, pp. 217–223.
5. Krivosheev, V.P., Sachko M.A., RCoS. Russian Federation certificate of registration of computer program 2009616229. publ. 11.11.2009.
6. Stefani E.P. Osnovy nastrojki reguljatorov teplojenergeticheskikh processov, Moscow, Jenergiya, 1972, 376 p.
7. Simulink – modelirovanie i i simuljacija dinamicheskikh sistem dlja Simulink – MathWorks company, Tel. +7 (495) 232-00-23 ad. 0609 – <http://matlab.ru/products/simulink> – E-Mail: [matlab@sl-matlab.ru](mailto:matlab@sl-matlab.ru).

#### Рецензенты:

Глушков С.В., д.т.н., профессор, директор Морского института информационных технологий, заведующий кафедрой автоматических и информационных систем, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, г. Владивосток;

Игнатюк В.А., д.ф.-м.н., профессор кафедры информационных технологий и систем, Владивостокский государственный университет экономики и сервиса, г. Владивосток.