

Робастное управление ректификационной колонной с компенсацией возмущений*

П. А. Гуцин, В. А. Винокуров, И. Б. Фуртат
РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина,

Институт проблем машиноведения РАН, г. Санкт-Петербург

Решена задача робастного управления ректификационной колонной, математическая модель которой представлена параметрически, функционально и структурно неопределенным линейным дифференциальным уравнением. Для решения задачи предлагалось использовать вспомогательный контур, подключенный параллельно объекту управления, который позволил выделить внутренние и внешние возмущения. Полученный алгоритм компенсирует возмущения и обеспечивает заданную точность процесса. Результаты проиллюстрированы численными примерами моделирования.

Ключевые слова: ректификационная колонна, робастное управление, компенсация возмущений, вспомогательный контур, наблюдатель.

Введение

В настоящее время ректификационная колонна находит широкое применение в процессах нефтехимии, основного органического синтеза и переработки нефти. Область применения ректификационной колонны постоянно расширяется. Этому способствуют внедрение в производство новых продуктов и технологических процессов, повышение требований к защите окружающей среды.

Необходимым условием для качественного управления ректификационной колонной является создание простых и надежных регуляторов для управления ею. На сегодняшний день предложено достаточное множество решений этой задачи.

Так, в работах [1, 2] в предположении полной определенности параметров объекта управления и о том, что модель объекта описывается линейным дифференциальным уравнением, приводится расчет ПИ и ПИД регуляторов. В работе [3] регулятор строится на базе обращения передаточной функции объекта управления. В работе [4] предложен способ синтеза системы управления на базе подходов LGQ, LGQ/LTR, DNA/INA, IMC и т. д.

Однако, как отмечено в работе [5], процессы в ректификационной колонне в значительной степени чувствительны к изменению внешних потоков и в меньшей степени чувствительны к изменению внутренних процессов в колонне. Поэтому даже незначительное отличие параметров модели от исходной (прототипа) приведет к невыполнению заданных показателей качества или к потере устойчивости, если при проек-

тировании системы управления использовать алгоритмы [1–4].

В работах [5–7] математическая модель ректификационной колонны представлена линейным дифференциальным уравнением, подверженным двум типам возмущений: параметрическим и структурным. Для управления предлагалось использовать метод H^∞ -оптимизации. Причем для каждого типа возмущений строились регуляторы с соответствующей динамической структурой.

В работе [8] предложено управление ректификационной колонной на базе нейросети. Однако структура регулятора и расчет настраиваемых параметров в нем достаточно сложны.

В настоящей работе решена задача робастного управления ректификационной колонной, математическая модель которой определена параметрически, структурно и функционально неопределенным линейным дифференциальным уравнением, записанным в LV-форме [5–9]. Решение основано на использовании подхода [10], обобщенного на класс структурно неопределенных объектов в работе [11]. Цель управления состоит в поиске непрерывного закона управления, обеспечивающего необходимое качество процесса с заданной точностью. Результаты работы проиллюстрированы числовыми примерами для неопределенных моделей ректификационной колонны, взятых из работ [5–9].

Постановка задачи

Рассмотрим ректификационную колонну, принципиальная схема которой представлена на рис. 1 [5–9].

* Исследование проводится в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

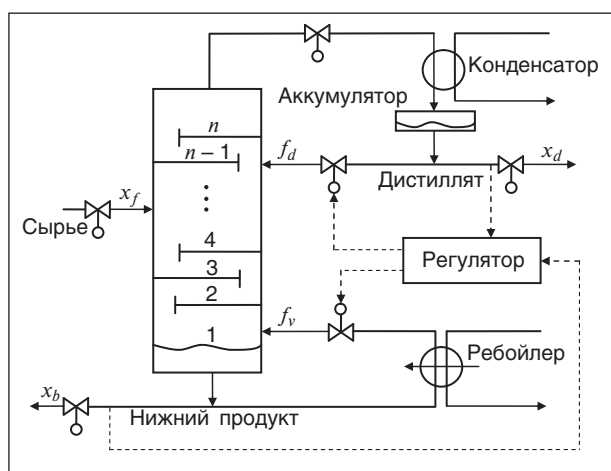


Рис. 1. Принципиальная схема ректификационной колонны

Пусть динамические процессы в ректификационной колонне описываются уравнением (LV-форма [5–9])

$$\begin{bmatrix} x_d(t) \\ x_b(t) \end{bmatrix} = G(p)(I + w_I(p)\Delta_I) \begin{bmatrix} f_d(t) \\ f_v(t) \end{bmatrix} + G_d(p)x_f(t), \quad (1)$$

где $x_d(t)$ — расход ректификата, моль/с; $x_b(t)$ — расход нижнего продукта, моль/с; $f_d(t)$ — обратный расход ректификата, моль/с; $f_v(t)$ — обратный расход нижнего продукта, моль/с; $x_f(t)$ — поток исходного сырья, моль/с; $G(\lambda)$ — номинальная составляющая передаточной функции математической модели объекта (1) с относительной степенью γ ; $G_d(\lambda)$ — передаточная функция по подаче исходного сырья; I — единичная матрица; $w_I(\lambda)$ — передаточная функция, содержащая структурные неопределенности математической модели объекта; Δ_I — числовая матрица, содержащая параметрическую неопределенность модели объекта; $p = d/dt$ — оператор дифференцирования; λ — комплексная переменная в преобразовании Лапласа.

Как отмечалось в работах [5, 6], LV-форма модели (1) выбрана потому, что она чаще используется в промышленной практике, чем DV- и DB-формы представления модели процесса ректификации.

В работах [5–8], при синтезе закона управления ректификационной колонной (1) (в [5–8] рассматривалась модель (1) без второго слагаемого в правой части) авторы рассматривают отдельно два типа возмущений: параметрические ($w_I(\lambda) = 1$) и структурные ($w_I(\lambda)$ — произвольная передаточная функция). Причем в работах [5–8] для каждого типа возмущений строится своя передаточная функция регулятора. В работе [9] предлагается модель класса (1), при этом

предполагается, что сигнал $x_f(t)$ — внешнее неконтролируемое возмущение.

Ниже предложен алгоритм, позволяющий компенсировать все виды возмущений, действующие на объект управления с неизменной структурой регулятора.

При решении задачи на объект управления накладываются следующие ограничения.

Предположения:

1. Неизвестные коэффициенты передаточной функции $w_I(\lambda)$ и матрицы Δ_I зависят от некоторого вектора неизвестных параметров $\vartheta \in \Xi$, где Ξ — известное ограниченное множество.

2. В системе управления доступны измерению сигналы $x_d(t)$, $x_b(t)$, $f_d(t)$ и $f_v(t)$.

Требуется спроектировать систему слежения выхода ректификационной колонны $y(t) = [x_d(t), x_b(t)]^T$ за эталонным сигналом $y_m(t) = [x_d^*(t), x_b^*(t)]^T$ в условиях неопределенности параметров, внешних возмущений и динамического порядка модели (1), чтобы было выполнено целевое условие

$$|y(t) - y_m(t)| < \delta \text{ при } t > T. \quad (2)$$

Здесь $\delta > 0$; T — время, по истечении которого с начала работы системы должно выполняться неравенство (2) для $\forall \vartheta \in \Xi$; $y_m(t)$ — гладкая ограниченная функция.

Метод решения

Введем обозначение $u(t) = [f_d(t), f_v(t)]^T$. Тогда уравнение (1) можно переписать в виде

$$y(t) = G(p)(I + w_I(p)\Delta_I)u(t) + G_d(p)x_f(t).$$

Принимая во внимание последнее выражение, составим уравнение для ошибки слежения $e(t) = y(t) - y_m(t)$ в виде

$$e(t) = G(p)(I + w_I(p)\Delta_I)u(t) + G_d(p)x_f(t) - y_m(t). \quad (3)$$

Следуя работе [10], введем вспомогательный контур

$$\tilde{e}(t) = \alpha G(p)u(t), \quad (4)$$

где $\alpha > 0$. С учетом (3) и (4) составим уравнение рассогласования $\zeta(t) = e(t) - \tilde{e}(t)$:

$$\zeta(t) = G(p)\phi(t),$$

$$\phi(t) = [(1 - \alpha)I + w_I(p)\Delta_I]u(t) + G^{-1}(p)G_d(p)x_f(t) + G^{-1}(p)y_m(t).$$

Здесь $\phi(t)$ — новая функция возмущения, содержащая в себе параметрические, функциональные и структурные неопределенности, действующие на объект (1).

Для компенсации неопределенностей, действующих на ректификационную колонну, зададим сигнал управления в виде

$$u(t) = -\alpha^{-1} G^{-1}(p) \tilde{\zeta}(t), \quad (5)$$

где $\tilde{\zeta}(t)$ – оценка сигнала $z(t)$, полученная с помощью наблюдателя [12]:

$$\dot{\tilde{\zeta}}_i(t) = G_0 \xi_i(t) + D_0 (\tilde{\zeta}_i(t) - \zeta_i(t)) \quad \tilde{\zeta}_i(t) = L \xi_i(t). \quad (6)$$

$$G_0 = \begin{bmatrix} 0 & I_{\gamma-1} \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

Здесь $\zeta_i(t)$, $\tilde{\zeta}_i(t)$ – i -ые компоненты векторов $\zeta(t)$ и $\tilde{\zeta}(t)$, $i = 1, 2$, $\xi_i(t) \in R^r$; G_0 , $I_{\gamma-1}$ – единичная матрица размерности $(\gamma-1) \times (\gamma-1)$; $D_0 = -[d_1 \mu^{-1}, \dots, d_\gamma \mu^{-\gamma}]$, коэффициенты d_1, \dots, d_γ выбираются из условия гурвицевости матрицы $G = G_0 - DL$; $D = [d_1, \dots, d_\gamma]^T$; μ – достаточно малая величина, $L = [1, 0, \dots, 0]$.

Для оценки точности наблюдения введем вектор отклонений

$$\bar{\eta}_i(t) = \Gamma^{-1} (\xi_i(t) - \theta_i(t)),$$

где

$$\Gamma = \text{diag} \{ \mu^{\gamma-1}, \dots, \mu, 1 \}$$

$$\theta_i(t) = [\zeta_i(t), \dot{\zeta}_i(t), \dots, \zeta_i^{(\gamma)}(t)]^T.$$

Продифференцировав $\bar{\eta}_i(t)$ по времени с учетом уравнения (6), получим

$$\dot{\bar{\eta}}_i(t) = \mu^{-1} G \bar{\eta}_i(t) + \bar{b} \zeta_i^{(\gamma+1)}(t), \quad \bar{\Delta}_i(t) = \mu^{\gamma-1} L \bar{\eta}_i(t),$$

$$\bar{b} = [0, \dots, 0, 1]^T.$$

Преобразуем предпоследнее уравнение в эквивалентное относительно выхода $\bar{\Delta}_i(t)$:

$$\dot{\eta}_i(t) = \mu^{-1} G \eta_i(t) + b \dot{\zeta}_i(t), \quad \bar{\Delta}_i(t) = \mu^{\gamma-1} L \eta_i(t). \quad (7)$$

Здесь $\eta_{i1}(t) = \bar{\eta}_{i1}(t)$, $b = [1, 0, \dots, 0]^T$. Последние два уравнения эквивалентны относительно переменных $\eta_{i1}(t) = \bar{\eta}_{i1}(t)$ в виду того, что являют-

ся различными векторно-матричными формами записи одного уравнения:

$$(p^\gamma + d_1 \mu^{-1} p^{\gamma-1} + \dots + d_\gamma \mu^{-\gamma}) \bar{\eta}_{i1}(t) = p^\gamma \zeta_i(t).$$

Принимая во внимание (5) и (7), уравнение ошибки слежения (3) преобразуем к виду

$$e(t) = \mu^{\gamma-1} G(p) [L, L] [\eta_1(t), \eta_2(t)]^T.$$

Утверждение. Пусть выполнены условия предположений 1, 2. Тогда существуют числа $T > 0$ и $\mu_0 > 0$ такие, что при $\mu \leq \mu_0$ система управления (4)–(6) обеспечивает выполнение целевого условия (2) для объектов класса (1) при $t \geq T$ для $\forall \vartheta \in \Xi$.

Доказательство утверждения аналогично доказательству в работе [11], поэтому здесь не приводится.

На рис. 2 приведена структурная схема робастного регулятора для управления ректификационной колонной.

Примеры моделирования

Рассмотрим ректификационную колонну, динамические процессы в которой описываются уравнением (1). Согласно работам [5–8] желаемое поведение процесса ректификации достигается, например, когда $y_m(t) = [x_d^*(t), x_b^*(t)]^T = [0,99, 0,01]^T$ (моль/с).

Выберем номинальную составляющую передаточной функции объекта (1) как

$$G(p) = \frac{1}{4500p+1} \begin{pmatrix} 0,878 & -0,864 \\ 1,082 & -1,096 \end{pmatrix}$$

с относительной степенью $\gamma = 1$ [5–8]. Сформируем систему управления, состоящую из:

- вспомогательного контура (4):

$$\tilde{e}(t) = \frac{1}{4500p+1} \begin{pmatrix} 0,878 & -0,864 \\ 1,082 & -1,096 \end{pmatrix} u(t),$$

где $\alpha = 1$;

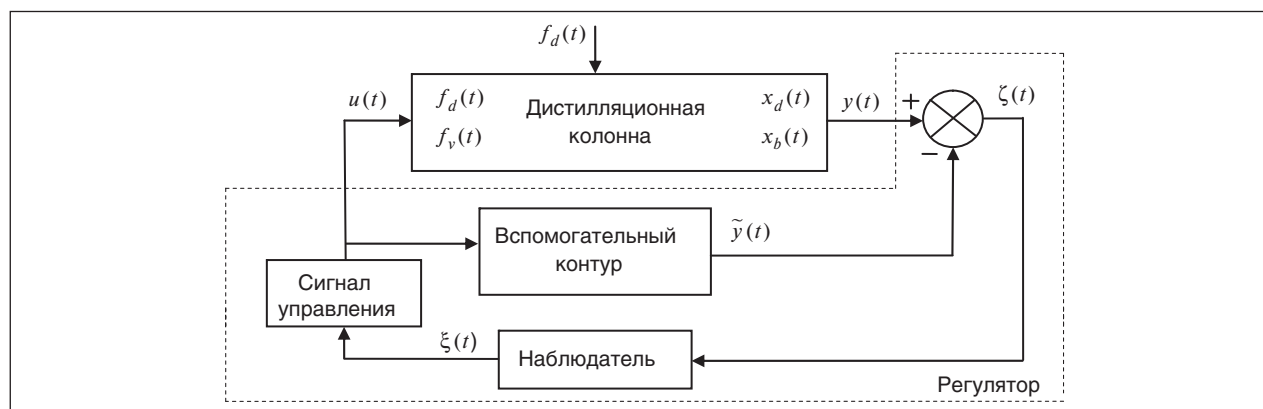


Рис. 2. Структурная схема робастного управления ректификационной колонной

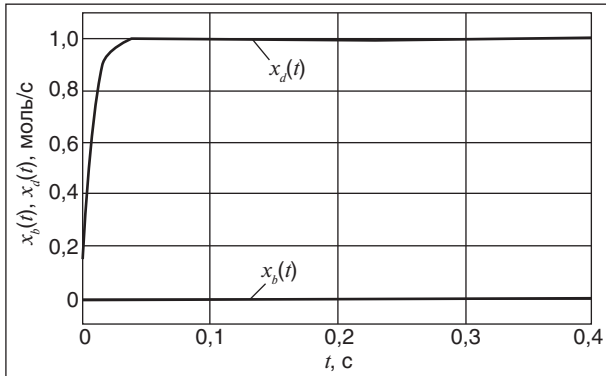


Рис. 3. Результаты моделирования по $x_d(t)$ (расход ректификата) и $x_b(t)$ (расход нижнего продукта)

- наблюдателя (6):

$$\dot{\xi}_{i1}(t) = -\xi_{i2}(t) - d_1 \mu^{-1} (\xi_{i1}(t) - \zeta_i(t)),$$

$$\dot{\xi}_{i2}(t) = -d_2 \mu^{-2} (\xi_{i1}(t) - \zeta_i(t)),$$

где $D = [d_1, d_2]^T = [2, 1]^T$, $\mu = 0,01$, $i = 1, 2$;

- закона управления (5):

$$u(t) = - \begin{bmatrix} 39,942 & -31,487 \\ 39,432 & -31,997 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 4500\xi_{12}(t) + \xi_{11}(t) \\ 4500\xi_{22}(t) + \xi_{21}(t) \end{bmatrix}.$$

На рис. 3 представлены результаты моделирования по $x_d(t)$ и $x_b(t)$ при следующих параметрах модели (1) (на объект (1) действуют только параметрические возмущения [5–8]):

$$y(t) = \frac{1}{4500p+1} \times$$

$$\times \begin{pmatrix} -0,878 & 0,014 \\ -1,082 & -0,014 \end{pmatrix} \left(\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0,2 & 0 \\ 0 & 0,2 \end{pmatrix} \right) u(t).$$

Рассмотрим также ректификационную колонну при следующих параметрах модели (1):

- на объект (1) действуют параметрические и структурные возмущения [5-8]:

$$y(t) = \frac{1}{4500p+1} \begin{pmatrix} 0,878 & -0,864 \\ 1,082 & -1,096 \end{pmatrix} \times \left(\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} + 0,2 \frac{5p+1}{0,5p+1} \begin{pmatrix} 0,2 & 0 \\ 0 & 0,2 \end{pmatrix} \right) u(t);$$

- на объект (1) действуют параметрические и структурные возмущения [5-8]:

$$y(t) = \frac{1}{4500p+1} \begin{pmatrix} 0,878 & -0,864 \\ 1,082 & -1,096 \end{pmatrix} \times \left(\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} + 0,5 \frac{10p+1}{10p} \begin{pmatrix} 0,2 & 0 \\ 0 & 0,2 \end{pmatrix} \right) u(t);$$

- на объект (1) действуют параметрические, структурные [5-8] и внешнее [9] $x_f(t) = 2 + \sin t$ возмущения:

$$y(t) = \frac{1}{4500p+1} \begin{pmatrix} 0,878 & -0,864 \\ 1,082 & -1,096 \end{pmatrix} \left(\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} + 0,2 \frac{5p+1}{0,5p+1} \begin{pmatrix} 0,2 & 0 \\ 0 & 0,2 \end{pmatrix} \right) u(t) + \begin{pmatrix} 0,7 \\ 14,4p+1 \\ 1,3 \\ 12p+1 \end{pmatrix} x_f(t-1).$$

Графики переходных процессов по $x_b(t)$ и $x_d(t)$ в системе управления для последних трех моделей подобны графикам на рис. 3, поэтому они не приводятся. Такое подобие графиков говорит о том, что система управления обладает робастностью по отношению к внутренним и внешним неконтролируемым неопределенностям.

Численное моделирование показало, что предложенная система управления компенсирует параметрические, функциональные и структурные неопределенности модели (1) и обеспечивает выполнение целевого условия (2) с заданной точностью. Качество переходных процессов зависит от выбора передаточной функции и коэффициента α во вспомогательном контуре (4), а также величины μ в наблюдателе (6). Важно отметить, что результаты переходных процессов значительно лучше по сравнению с результатами в работах [5–9]. К тому же реализация системы управления и расчет параметров в ней проще, чем в работах [5–9], где для каждого вида возмущений использовался отдельный регулятор.

Заключение

В статье синтезирован новый алгоритм робастного управления ректификационной колонной, математическая модель которой представлена параметрически, функционально и структурно неопределенным линейным дифференциальным уравнением. Задача решалась с использованием подхода [10], обобщенного на класс структурно неопределенных объектов в работе [11]. Моделирование показало хорошие показатели качества для всех видов неопределенностей объекта при использовании одного регулятора с постоянной структурой. В отличие от ранее предложенных способов управления ректификационной колонной [1–9], здесь предложен алгоритм, который прост в технической реализации и расчете настраиваемых параметров, а также обеспечивает лучшие показатели качества переходных процессов при любых типах возмущений, действующих на объект управления из указанного класса.

Литература

1. Xianku Z., Yicheng J. Control of a multivariable high purity distillation column based on closed-loop gain shaping algorithm // International Journal of Information Technology. — 2005. — V. 11. — N. 5. — P. 116–123.
2. Hsu T. -S., Yu C. -C., Liou C. -T. Composition control of high-purity distillation columns // Journal of Chinese Institute of Chemistry Engineering. — 1990. — V. 21. — N. 2. — P. 105–113.
3. Tyreus B. D. Multivariable control system design for an industrial distillation column // Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development. — 1979. — V. 18. — N. 1. — P. 177–182.
4. Diggelen R. C., Kiss A. A., Heemink W. Comparison of control strategies for dividing-wall columns // Industrial & Engineering Chemistry Research. — 2010. — V. 49. — N. 1. — P. 288–307.
5. Skogestad S., Morari M., Doyle J. Robust control of ill-conditioned plants: high-purity distillation // IEEE Transaction on Automatic Control. — 1988. — V. 33. — N. 12. — P. 1092–1105.
6. Razzaghi K., Shahraki F. Robust control of a high-purity distillation column using μ -synthesis // Iranian Journal of Chemical Engineering. — 2006. — V. 3. — N. 2. — P. 20–32.
7. Musch H. E., Steiner M. Robust PID control for an industrial distillation column // IEEE Control Systems Magazine. — 1995. — V. 15. — N. 4. — P. 46–55.
8. Yu W., Poznyak A. S., Alvarez J. Nero control multicomponent distillation column // 14th World Congress of IFAC. — Beijing, 1999. — P. 379–384.
9. Marlin T. E. Process control, design processes and control systems for dynamic performance. — Singapore: McGraw-Hill International Education, 1995.
10. Цыкунов А. М. Алгоритмы робастного управления с компенсацией ограниченных возмущений // Автоматика и телемеханика. — 2007. — № 7. — С. 103–115.
11. Фуртат И. Б., Цыкунов А. М. Робастное управление нестационарными нелинейными структурно неопределенными объектами // Проблемы управления. — 2008. — № 5. — С. 2–7.
12. Atassi A. N., Khalil H. K. A separation principle for the stabilization of class of nonlinear systems // IEEE Transaction on Automatic Control. — 1999. — V. 44. — N. 9. — P. 1672–1687.

P. A. Gushin, V. A. Vinokurov, and I. B. Furtat

Robust Control of Distillation Column with Disturbances Compensation

The problem of robust control of distillation column which mathematical model, represented parametrically, functionally and structurally via uncertain linear differential equation is solved. To solve the problem, using of an auxiliary circuit connected in parallel with control object, which allowed identifying internal and external disturbances, was offered. The resulting algorithm compensates disturbances and provides specified process accuracy. The results of numerical examples of modeling are illustrated.

Key words: distillation column, robust control, disturbance compensation, auxiliary circuit, observer.

Вниманию специалистов!

Т. В. Бухаркина, С. В. Вержичинская, Н. Г. Дигуров, Б. П. Туманян

ХИМИЯ ПРИРОДНЫХ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ И УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрены основные физико-химические свойства природных углеродсодержащих энергоносителей — углей, нефтей, углеводородных газов. Особое внимание отводится природным и синтетическим формам свободного углерода. Приводятся механизмы химических превращений углеводородов в технологиях их переработки.

М.: Издательство «Техника», 2009. — 204 с.

А. М. Данилов

ВВЕДЕНИЕ В ХИММОТОЛОГИЮ

Книга посвящена применению топлив, масел, специальных жидкостей. Приводится обширный справочный материал по их характеристикам и эксплуатационным свойствам. Изложены принципы создания и эксплуатации двигателей.

Книга адресована широкому кругу читателей.

М.: Издательство «Техника», 2003. — 464 с.