

*Проведено аналіз проблеми розробки робастної багатовимірної системи управління багатокомпонентними нафтовими ректифікаційними колонами на прикладі колони К-2. Динамічні характеристики колони К-2 інерційні, мінливі і не можуть бути точно представлені типовими ланками. Запропоновано алгоритм синтезу системи автоматичного управління на базі лінійно-квадратичного регулятора, який забезпечує її робастність при зміні динамічних характеристики об'єкту управління*

*Ключові слова: багатокомпонентна ректифікаційна колона, лінійно-квадратичний регулятор, нафта, система автоматичного управління*

*Проведен анализ проблемы разработки робастной многомерной системы управления многокомпонентными нефтяными ректификационными колоннами на примере колонны К-2. Динамические характеристики колонны К-2 инерционны, изменчивы и не могут быть точно представлены типовыми звеньями. Предложен алгоритм синтеза системы автоматического управления на базе линейно-квадратичного регулятора, обеспечивающий её робастность при изменении динамических характеристик объекта управления*

*Ключевые слова: многокомпонентная ректификационная колонна, линейно-квадратичный регулятор, нефть, система автоматического управления*

УДК 681.51

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.50964

# РАЗРАБОТКА РОБАСТНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КОЛОННОЙ АТМОСФЕРНОЙ ПЕРЕГОНКИ НЕФТИ

**А. А. Стопакевич**

Кандидат технических наук, доцент  
Кафедра компьютерно-интегрированных  
технологических процессов и производств  
Одесская национальная  
академия связи им. А. С. Попова  
ул. Кузнечная, 1, г. Одесса, Украина, 65029  
E-mail: stopakevich@gmail.com

## 1. Введение

Синтез многомерных систем автоматического управления (САУ) для таких сложных технологических объектов управления как многокомпонентная нефтяная ректификационная колонна (РК) является актуальной научной задачей, сложность которой заключается в таких особенностях объекта управления, как значительная инерционность процессов, дрейф параметров во времени и нестабильность состава исходной смеси.

При синтезе систем управления нефтяными ректификационными колоннам остро стоит проблема робастности, поскольку модель, которая используется при синтезе системы управления, априорно значительно не совпадает с реальной динамикой ректификационной колонны. Разрабатываемая подобным образом система управления должна быть робастной к значительным отличиям поведения объекта управления от его модели и, в то же время, не должна серьезно ухудшать качество управления, чтобы её применение было технически оправданным.

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Теме синтеза современных автоматических систем управления химико-технологическими процессами, в том числе нефтяными ректификационными колонна-

ми, посвящена монография [1]. Выделяется два основных подхода к синтезу систем: традиционный подход, в котором используются ПИД регуляторы, параметры которых уточняются на объекте управления, а также подход, основанный на использовании математической модели. Использование последнего является предпочтительным, поскольку позволяет разрабатывать регуляторы, закон управления которых учитывает особенности математической модели, а также дает возможность проверить различные стратегии управления.

Среди основных универсальных методов синтеза многомерных робастных систем автоматического управления можно выделить следующие: классический LQR, LQG и  $H_\infty$ . Проблема синтеза систем автоматического управления с помощью данных методов рассмотрена в монографии [2]. Классический метод синтеза с использованием только LQR (Linear-quadratic regulator, линейно-квадратичного регулятора) [3] гарантирует устойчивость замкнутой системы управления с запасом  $60^\circ$  по фазе, однако не может быть применен для большинства производственных технологических объектов управления в силу требования измеримости всех состояний объекта управления. Данное требование может быть выполнено для ректификационной колонны только путем использования очень грубой модели, что устраняет все преимущества данного подхода, поскольку качество управления в сравнении с классическими системами на ПИД-регуляторах повышается главным

образом за счет использования точной модели объекта управления. Задача LQG (Linear Quadratic Gaussian, линейно-квадратичное гауссовское) управление требует параллельного включения в систему управления фильтра Калмана, что не всегда гарантирует робастность замкнутой системы управления. Проблема отсутствия четкой границы устойчивости в задаче LQG на примере простейшего объекта с одним каналом управления приведена в работе [4]. Также, ориентация на моделирование неопределенности с помощью белого шума не может полностью гарантировать робастность замкнутой системы при параметрической неопределенности объекта управления. Самым распространенным методом решения проблемы робастности является метод LQG/LTR. В данном методе границы собственных значений функции чувствительности замкнутой системы автоматического управления должны быть сначала определены при решении задачи синтеза методом LQG, а затем их диапазоны поддерживаются путем изменения коэффициента передачи в LQR задаче. Пример синтеза системы управления методом LQG/LTR приведен в [5]. Метод синтеза  $H_\infty$  ориентирован на достижение устойчивости замкнутой системы при минимальном оптимальном управляющем воздействии даже при наличии максимальных возмущений для объекта управления. Задача синтеза сводится к минимизации  $H_\infty$ -нормы, которая равняется максимальному сингулярному числу передаточной функции системы, что для одномерной системы равняется максимальному запасу устойчивости на частотной характеристике. Стоит отметить, что робастность в рассмотренных методах рассматривается для линейных систем, что не гарантирует наличие такого же показателя робастности на реальной нелинейной системе.

Отметим, что многомерные регуляторы, которые синтезируются при использовании методов LQG/LTR и  $H_\infty$ , формируются только в непрерывном времени, что требует использования специальных методов дискретизации или решателей и усложняет техническую реализацию регулятора, снижает надежность его работы. В то же время LQR-регулятор и фильтр Калмана могут быть реализованы в дискретной форме прямыми методами.

В нефтегазовой отрасли получили широкое применение коммерческие реализации многомерных модельно-прогнозирующих регуляторов (Model Predictive Control, MPC). Данные регуляторы часто применяются для реализации систем управления нефтяными ректификационными колоннами [6]. Для синтеза и эксплуатации модельно-прогнозирующих регуляторов точные модели высокого порядка малоприменимы из-за особенностей архитектуры регуляторов, в которой для расчета управляющего воздействия на каждом шаге выполняется оптимизационная задача с ограничениями на отклонения управляющих воздействий и управляемых переменных, требующая затратных по времени сложных вычислений. Следовательно, при наличии у разработчика системы управления модели высокого порядка для синтеза модельно-прогнозирующего регулятора данную модель рекомендуется редуцировать до максимально простой [7].

Исходя из особенностей модельно-прогнозирующих регуляторов и устоявшихся методик синтеза децентрализованных систем управления на базе ПИД регуляторов, большинство разработчиков систем уп-

равления нефтяными ректификационными колоннами предпочитают использовать для синтеза систем управления модели в передаточных функциях первого порядка с запаздыванием. Как правило, такие модели либо уже существуют, либо могут быть довольно быстро получены, в отличие от моделей высокого порядка, с помощью процедуры идентификации.

Как было показано в обзорной работе [8], распространенные реализации и методы синтеза модельно-прогнозирующих регуляторов с ограничениями не рассматривают проблему робастности, а предлагаемые исследователями альтернативные подходы не могут рассматриваться как универсальные и достижение эффекта с их помощью является трудоемкой творческой задачей. Следовательно, робастность разработанных таким образом систем не гарантируется.

Известно, что модельно-прогнозирующий регулятор без ограничений и при ограничениях с достаточным горизонтом управления является эквивалентом линейно-квадратичного регулятора [9]. Практическая идентичность переходных процессов в данных типах многомерных регуляторов на примере простого объекта управления показана в работе [10]. Техническая реализация модельно-прогнозирующих регуляторов достаточно сложна, поскольку требует эффективных алгоритмов решения оптимизационной задачи. Конкретные реализации данных алгоритмов зависят от производителя и, как правило, являются коммерческой тайной. Робастность системы управления зависит от качества реализации данных алгоритмов. На этом фоне использование линейно-квадратичного регулятора имеет явное преимущество – техническая реализация системы управления на базе линейно-квадратичного регулятора значительно проще и менее требовательна к аппаратным ресурсам.

Следовательно, синтезированная с учетом требования робастности многомерная система автоматического управления нефтяной ректификационной колонной на базе линейно-квадратичного регулятора может рассматриваться как реальная альтернатива существующим САУ на базе модельно-прогнозирующих регуляторов. С практической точки зрения под робастностью будем понимать не столько традиционную ее интерпретацию, как ухудшение качества управления при отклонении параметров линейной математической модели, сколько стабильность качества управления при изменении структуры и порядка математической модели. Изменение динамических характеристик как во времени, так и в зависимости от режима работы, является особенностью нефтяных ректификационных колон, что предъявляет повышенные требования к качеству систем автоматического управления.

---

### 3. Цели и задачи исследования

---

Целью работы является разработка и исследование системы автоматического управления ректификационной колонной переработки сырой нефти, отличающейся робастностью при изменении вида моделей колонны, учетом многомерности и многосвязности объекта управления, повышенным качеством процессов управления, ориентацией исключительно на параметры материального баланса, простотой цифровой реализации.

При разработке системы автоматического управления любой технологической установкой определяющими факторами являются наличие математической модели динамики с обоснованным выбором управляемых переменных, структура системы управления, методика синтеза автоматического регулятора.

Поскольку к математической модели динамики предъявляются противоречивые требования – с одной стороны высокая адекватность, с другой – простота, то на основе экспериментальных динамических характеристик РК К-2 был создан набор из четырех моделей динамики: сложной  $M_1$ , аппроксимированных  $M_2$  и  $M_3$ , грубой редуцированной  $M_4$ .

Структура системы автоматического управления должна быть максимально простой, надежной и гибкой. Такая структура позволяет быстро адаптировать систему к изменению условий проведения технологического процесса. Максимально соответствует указанным требованиям система с небольшим количеством элементов, в которой не требуется для её технической реализации использования специальных сложных или закрытых вычислительных алгоритмов, а настройки регулятора легко изменяются в случае необходимости.

Методика синтеза регулятора во многом определяет эффективность, экономичность и надежность ведения технологического процесса, что во многом зависит от критерия качества, положенного в основу методики. Методика должна быть понятной и легко применимой, максимально точно учитывать динамические характеристики объекта управления и обладать достаточным запасом устойчивости к расхождению реальной динамики объекта управления и её математической модели. Наилучшей методикой синтеза регулятора является методика, в которой настройки регулятора могут быть получены с помощью простых инженерных расчетов или с использованием распространенных САПР.

Таким образом, для достижения поставленной цели необходимо:

- использовать набор математических моделей разной сложности, применяемых при разработке и обеспечивающих робастность создаваемой САУ;
- задать требования к функционированию системы управления;
- выбрать адекватную требованиям структуру системы управления;
- разработать методику определения настроек регулятора по заданному критерию оптимальности;
- обосновать пригодность разработанной системы управления к промышленному применению.

#### 4. Разработка робастной многомерной САУ нефтяной РК

##### 4.1. Моделирование РК как объекта управления

В качестве объекта управления выбрана РК К-2 – основная установка в технологическом процессе

первичной переработки нефти. Многокомпонентная ректификационная колонна К-2 рассматривается как ОУ с четырьмя управляющими воздействиями и четырьмя управляемыми переменными.

Управляющими воздействиями РК являются:  $u_1$  – расход флегмы,  $u_2$  – расход керосина в стриппинг,  $u_3$  – расход дизеля в стриппинг,  $u_4$  – расход газойля в стриппинг. Номинальная величина ( $n$ ) управляющих воздействий – 50 % хода регулирующего органа (хро).

Управляемыми переменными РК являются:  $y_1$  – уровень в конденсаторе с номиналом 50 %,  $y_2$  – расход керосина после стриппинга с номиналом 79,3 м<sup>3</sup>/ч,  $y_3$  – расход дизеля после стриппинга с номиналом 126,5 м<sup>3</sup>/ч,  $y_4$  – расход газойля после стриппинга с номиналом 14 м<sup>3</sup>/ч.

Полная математическая модель ректификационной колонны К-2 соответствует модели пакета программ математического моделирования химико-технологических систем Aspen HYSYS, а аппроксимированная модель первого порядка с запаздыванием представлена в табл. 1.

Таблица 1

Матрица передаточных функций ректификационной колонны К-2

Входы/ Выходы	$u_1, \%$ ( $n=50 \%$ )	$u_2, \%$ ( $n=50 \%$ )	$u_3, \%$ ( $n=50 \%$ )	$u_4, \%$ ( $n=50 \%$ )
$y_1, \%$ ( $n=50\%$ )	$\frac{-0.1646}{1.074s + 1}$	$\frac{-0.1085}{0.8325s + 1} e^{-0.0691s}$	$\frac{-0.01464}{0.8508s + 1} e^{-0.0558s}$	$\frac{-0.001054}{0.9423s + 1} e^{-0.0609s}$
$y_2, \text{м}^3/\text{ч}$ ( $n=79,3$ )	$\frac{-0.6795}{0.8628s + 1}$	$\frac{0.7332}{0.5101s + 1} e^{-0.108s}$	$\frac{0.0261}{0.4552s + 1} e^{-0.834s}$	$\frac{0.0001571}{1.183s + 1} e^{-0.523s}$
$y_3, \text{м}^3/\text{ч}$ ( $n=126,5$ )	$\frac{-0.398}{0.5501s + 1} e^{-1.19s}$	$\frac{-1.821}{0.3026s + 1} e^{-0.791s}$	$\frac{0.2627}{0.3885s + 1} e^{-0.589s}$	$\frac{0.05411}{0.2832s + 1}$
$y_4, \text{м}^3/\text{ч}$ ( $n=14$ )	$\frac{1.632}{0.4524s + 1} e^{-0.727s}$	$\frac{-0.1132}{0.2116s + 1} e^{-1.81s}$	$\frac{-0.09905}{0.0849s + 1} e^{-0.938s}$	$\frac{-0.01121}{0.06839s + 1} e^{-0.116s}$

Примечание: время в часах

Как видно из табл. 1, данный объект управления (ОУ) является многомерным и многосвязным со значительной инерционностью. Для иллюстрации неточности представления переходных процессов в данной модели проведем её сравнение с полной моделью высокого порядка путем построения разгонных характеристик при скачке по  $u_j$  величиной 1 % (рис. 1, а–г).

##### 4.2. Формулировка требований к многомерной системе управления

Целью разрабатываемой системы автоматического управления нефтяной ректификационной колонной является максимально устойчивое к возмущениям поддержание материального баланса. В качестве возмущений примем возмущения по нагрузке – основной вид возмущения, величина которого всегда эквивалентна процентам хода исполнительного механизма.

Будем считать многомерную систему робастной, если результаты математического моделирования показывают её способность устранить с учетом регламентных требованиях возмущения по нагрузке на 3 моделях нефтяной ректификационной колонны К-2, представленных в форме пространства состояний с  $dt=1$  мин: модель высокого порядка  $M_1$  (77 состояний), модель первого порядка с запаздыванием с представлением запаздывания путем ввода задержек в систему с помощью

интервалов дискретизации  $M_2$  (243 состояния), модель первого порядка с запаздыванием с представлением запаздывания звеном Паде 2 порядка  $M_3$  (42 состояния).

В дискретном времени критерий оптимальности линейно-квадратичного регулятора может быть представлен следующим образом:

$$J = \sum_{i=0}^{\infty} y_i^T \cdot Q_1 \cdot y_i + u_i^T \cdot R \cdot u_i, \quad (3)$$

где  $Q_1 \geq 0, R > 0$  – матрицы весовых коэффициентов.

Таким образом, критерий оптимальности линейно-квадратичного регулятора позволяет в явном виде минимизировать не только отклонение управляемой переменной, но и отклонение управляющего воздействия.

Линейно-квадратичный регулятор имеет два основных недостатка: необходимость иметь информацию обо всех состояниях ОУ, что возможно только при описании каналов ОУ звеньями первого порядка без запаздывания, и наличие статической ошибки при возмущении с помощью скачка. Следовательно, он не может быть применен сам по себе для качественного управления технологическими объектами. Указанные проблемы будут решены путем синтеза многомерного регулятора, который включает линейно-квадратичный регулятор, наблюдатель состояния и интегратор в качестве модели возмущений.

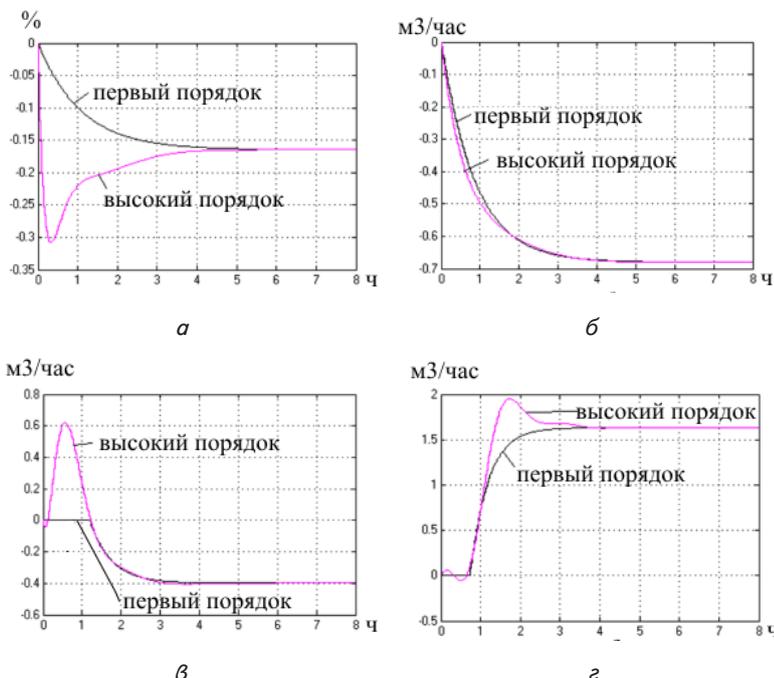


Рис. 1. Разгонные характеристики моделей высокого порядка ( $M_3$ ) и первого порядка с запаздыванием ( $M_2$ ) при  $\Delta u_i = 1\%$ :  
 а –  $\Delta u_1$ ; б –  $\Delta u_2$ ; в –  $\Delta u_3$ ; г –  $\Delta u_4$

Нефтяная ректификационная колонна – это объект управления, в котором нелинейность динамических характеристик становится существенной при отклонении номинальных значений параметров на 10%. При этом желательно использовать минимально возможные управляющие воздействия. Следовательно, будем считать переходной процесс не выходящим за пределы регламента, если величина управляющих воздействий в нем отклоняется максимум на  $\pm 40\%$  хро (10% – запас), а управляемых переменных – в диапазоне  $\pm 10\%$  их номинального значения.

**4. 3. Обоснование выбора структуры системы управления**

В качестве основы структуры системы автоматического управления был выбран линейно-квадратичный регулятор. Линейно-квадратичный регулятор – это оптимальный регулятор, который предназначен для управления сложными многомерными и многосвязными объектами управления. Данный регулятор состояния использует метод представления динамики систем в виде пространства состояний [11]:

$$x_{i+1} = A \cdot x_i + B \cdot u_i, \quad y_i = C \cdot x_i. \quad (1)$$

Управляющее воздействие вычисляется по закону:

$$u_i = K \cdot x_i, \quad K = \text{dlqr}(A, B, Q, R), \quad (2)$$

где  $K$  – матрица регулятора состояния,  $x$  – вектор состояния.

**4. 4. Выбор параметров критерия оптимальности для синтеза линейно-квадратичного регулятора**

Весовые коэффициенты управляемых переменных определим по правилу:

$$Q = C^T \cdot Q_1 \cdot C, \quad R = w_2 \cdot I, \quad Q_1 = w_1 \cdot \text{diag}[q_{11}; q_{22}; q_{33}; q_{44}], \quad (4)$$

где  $q_{11}, q_{22}, q_{33}, q_{44}$  – приведенные к масштабу положительные весовые коэффициенты отклонений выходов ОУ;  $w_1, w_2$  – положительные общие множители весовых коэффициентов для настройки значимости отклонений управляемых переменных и управляющих воздействий.

Примем значимость отклонения управляемых переменных равными в процентном отношении, тогда:

$$\left(\frac{1}{10} \cdot 50 \cdot q_{11}\right)^2 = \left(\frac{1}{10} \cdot 79.3 \cdot q_{22}\right)^2 = \left(\frac{1}{10} \cdot 126.5 \cdot q_{33}\right)^2 = \left(\frac{1}{10} \cdot 14 \cdot q_{44}\right)^2 \rightarrow q_{11} = 1; q_{22} = 0.3976; q_{33} = 0.1562; q_{44} = 12.765. \quad (5)$$

**4. 5. Обоснование выбора метода синтеза наблюдателя состояния**

Наблюдатель состояния восстанавливает недоступные измерению переменные состояния. Задача

конструирования наблюдателя позволяет выбрать матрицу наблюдателя  $L$  так, чтобы минимизировалась ошибка восстановления недоступного изменению вектора состояния  $x$ . Для этого возможно использовать наблюдатель полного порядка, который для системы в дискретном виде записывается следующим образом:

$$\bar{x}_{i+1} = A \cdot \bar{x}_i + B \cdot u_i + L \cdot (y_i - C \cdot \bar{x}_i). \quad (6)$$

Наблюдатель решает поставленную задачу, если матрица  $A - L \cdot C$  – нильпотентна, т. е.  $|\lambda(A - L \cdot C)| < 1$ . В этом случае  $\lim_{i \rightarrow \infty} (x_i - \bar{x}_i) = 0$  [12].

Наиболее распространенным способом синтеза наблюдателя для многомерных систем управления на базе линейно-квадратичных регуляторов является применение методологии линейно-квадратичного гауссовского управления (LQG), в которой наблюдатель получается с помощью решения квадратного матричного уравнения Риккати (фильтр Калмана). В Matlab матрицу наблюдателя таким образом можно вычислить с помощью следующей команды:

$$L = dlqr(A^T, C^T, Q_2, w_3 \cdot R_2)^T, \quad Q_2 \geq 0, \quad R_2 > 0. \quad (7)$$

В ситуации, когда характер шумов неизвестен (решение данной задачи требует точной информации о метрологических и технических характеристиках средств автоматизации) возможно получить устойчивый для заданной модели наблюдатель путем выбора единичных весовых матриц  $Q_2$  и  $R_2$ .

Однако этот распространенный метод синтеза наблюдателя для рассматриваемого объекта управления не позволяет достичь робастности многомерного регулятора.

Для иллюстрации данной особенности проведем синтез многомерного регулятора на базе модели высокого порядка с наблюдателем полного порядка, синтезированным с помощью решения уравнения Риккати, и проверим его устойчивость в замкнутой системе.

Матрица регулятора состояния в дискретном времени с наблюдателем в пространстве состояний формируется следующим образом:

$$A_r = A - B \cdot K - L \cdot C; \quad B_r = L; \quad C_r = K, \quad (8)$$

где  $A, B, C$  – матрицы модели высокого порядка.

Критерий устойчивости замкнутой системы следующий:

$$st = \max \left( \left| \lambda \left( \begin{bmatrix} A_c & B_c \cdot C_r \\ B_r \cdot C_c & A_r \end{bmatrix} \right) \right| \right) < 1, \quad (9)$$

где в качестве матриц  $A_c, B_c, C_c$  подставляются матрицы разработанных нами моделей ( $M_1, M_2, M_3$ ) разной структуры и размерности, описывающих объект управления.

Влияние порядка множителей весовых матриц линейно-квадратичного регулятора и наблюдателя  $w_1, w_2, w_3$  на устойчивость замкнутой системы с разными моделями объекта управления проиллюстрировано в табл. 2.

Таблица 2

Результаты проверки устойчивости замкнутой системы

$w_1$	$w_2$	$w_3$	$st_{M1}$	$st_{M2}$	$st_{M3}$
1	1	1	0.9976	1.0003	0.9969
10	1	1	0.9976	1.0131	1.0096
0.1	1	1	0.9976	0.9969	0.9969
1	10	1	0.9976	0.9969	0.9969
1	0.1	1	0.9976	1.0131	1.0096
1	1	10	0.9976	0.9997	0.9969
1	1	0.1	0.9976	1.0004	0.9969

Как видно из табл. 2, синтез наблюдателя с помощью решения уравнения Риккати не гарантирует робастность замкнутой САР. Робастность достигается либо путем снижения значимости отклонений управляемых переменных ( $w_1$ ), либо путем уменьшения величины управляющих воздействий ( $w_2, w_3$ ). При данных ограничениях качественных переходных процессов достичь довольно трудно и робастность системы достигается ценой выхода переходных процессов за регламентные нормы. Также, отметим, что аналогичный эффект наблюдается при синтезе многомерного регулятора на основе моделей  $M_2$  и  $M_3$ .

Задача выбора матрицы  $L$  наблюдателя также может быть решена с помощью метода размещения полюсов таким образом, чтобы матрица  $E = A - L \cdot C$  имела заданные собственные числа. Считается, что наблюдатель должен работать быстрее регулятора, поэтому собственные числа матрицы замкнутой системы должны быть меньше по модулю собственных чисел матрицы  $E$ .

Для расчета матрицы  $L$  можно использовать Matlab-программу `place`, которая позволяет достичь заданного размещения полюсов с достаточной точностью и с учетом устойчивости системы к изменениям параметров объекта управления. Полностью указанный метод описан в [12]. Вызов программы проводится следующим образом:

$$L = place(A^T, C^T, p)^T, \quad (10)$$

где  $p$  – вектор желаемых полюсов (все различные).

Проблемой данного метода является высокая чувствительность алгоритмов требуемых матричных преобразований к погрешностям вычислений, и, следовательно, его практически невозможно использовать на сложных моделях высокого порядка. Альтернативный алгоритм Акермана (программа `acker`) для одномерных систем является еще менее точным, причем рекомендуемый предел размерности модели – всего 5 состояний.

Таким образом, ни одна из рассмотренных моделей  $M_1, M_2$  и  $M_3$  не может быть использована для расчета параметров наблюдателя с помощью метода размещения полюсов. Попытка использовать команду `place` для указанных моделей приводит либо к ошибке, либо к неустойчивости. Следовательно, для синтеза наблюдателя методом полюсов необходимо еще больше упростить модель объекта управления.

**4. 6. Формирование модели объекта управления с минимальным количеством состояний**

Наиболее простой по структуре и минимальной по количеству состояний из рассмотренных моделей является модель  $M_3$ , которая имеет 42 состояния. При построении сбалансированной реализации данной модели диагональ результирующего граммаиана может быть использована для понижения порядка модели. С помощью Matlab-программы `modred` можно понизить порядок модели  $M_3$  до 11 состояний, причем процессы в редуцированной и исходной моделях практически совпадают. Обозначим полученную модель с минимальным количеством состояний как  $M_4$  и воспользуемся ей для синтеза многомерного регулятора.

**4. 7. Синтез робастной многомерной САУ РК К-2**

Для того, чтобы устранить статическую ошибку в линейно-квадратичном регуляторе, модель объекта необходимо объединить с моделью возмущений в виде скачка [11]. Для этого на выходы модели  $M_4$  в дискретном времени с шагом дискретности 60 сек добавим матричный интегратор по правилу:

$$A_1 = \begin{bmatrix} A & 0 \\ C & I \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}, C_1 = [0 \quad I], \tag{11}$$

где  $I$  – единичная матрица соответствующей размерности.

Начальные регулировочные матрицы линейно-квадратичного регулятора для включения модели возмущений перепишем следующим образом

$$Q_1 = \text{diag}([q_{11}, q_{22}, q_{33}, q_{44}]) = \text{diag}([1, 0.3976, 0.1562, 12.765]),$$

$$R_1 = \text{diag}([r_{11}, r_{22}, r_{33}, r_{44}]) = \text{diag}([1, 1, 1, 1]),$$

$$Q = \begin{bmatrix} C^T \cdot w_1 \cdot Q \cdot C & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}, R = w_2 \cdot R_1. \tag{12}$$

Регулятор состояния и наблюдатель для пропорциональной и интегральной части регулятора рассчитаем следующим образом:

$$K = [K_1, K_2] = \text{dlqr}(A_1, B_1, Q, R), \tag{13}$$

$$L = \text{place}(A_1^T, C_1^T, p)^T,$$

$$p = w_3 \cdot [0.9960 \dots 0.9379].$$

Матрицу многомерного регулятора составим следующим образом:

$$A_R = \begin{bmatrix} A - B \cdot K_1 & -B \cdot K_2 - L_1 & L_1 \\ C & I - L_2 & L_2 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix}, B_R = \begin{bmatrix} 0 & B \\ 0 & 0 \\ I & 0 \end{bmatrix},$$

$$C_R = [-K_1 \quad -K_2 \quad 0]. \tag{14}$$

**5. Проверка робастности разработанного многомерного регулятора**

Для проверки робастности проведем математическое моделирование реакций на возмущение разработанной робастной многомерной системы управления и децентрализованной системы на базе ПИ-регуляторов, подключенных к моделям объектов управления  $M_1, M_2$  и  $M_3$ . Настройки ПИ регуляторов были получены с помощью частотного метода, реализованного в блоке PID Controller пакета Matlab, с учетом запаса устойчивости в 60 градусов по фазе.

После анализа разгонных характеристик моделей ОУ были выбраны два сочетания возмущений по нагрузке управляющих потоков объекта управления, которые приводят к максимально отличным разгонным характеристикам. Для проверки качества работы систем управления промоделируем подачу возмущений ( $f$ ) на объект управления в заданные периоды времени ( $t$ ):

$$\begin{cases} f = [5; 5; 5; 5], & \text{при } 0 \leq t \leq 10; \\ f = [0; 0; 0; 0], & \text{при } 10 < t \leq 20; \\ f = [5; -5; -5; 5], & \text{при } 20 < t \leq 30. \end{cases} \tag{15}$$

Процессы в модели  $M_1$  объекта управления при подаче возмущений приведены на рис. 2,  $a-z$ .

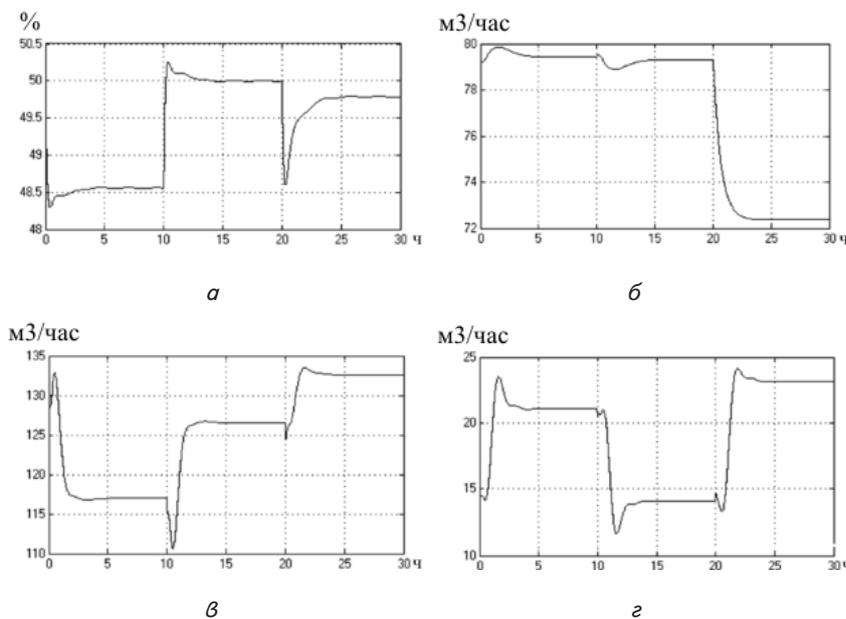


Рис. 2. Процессы в объекте управления при подаче возмущений:  $a - \Delta y_1$ ;  $б - \Delta y_2$ ;  $в - \Delta y_3$ ;  $г - \Delta y_4$

Результаты математического моделирования многомерной робастной и децентрализованной систем управления при подключении к математическим моделям  $M_1, M_2, M_3$  приведены на рис. 3,  $a-z$ .

Основные результаты моделирования приведены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

Результаты моделирования — управляемые переменные

Выход, Номинал	f=[5;5;5;5], %				f=[5; -5; -5;5], %			
	САУ	$t_{уст}$	$Y_{min}$ ( $t_{min}$ )	$Y_{max}$ ( $t_{max}$ )	САУ	$t_{уст}$	$Y_{min}$ ( $t_{min}$ )	$Y_{max}$ ( $t_{max}$ )
$y_1$ 50 %	MP-M1	2.60	49.53 (0.07)	50.18 (0.60)	MP-M1	3.95	49.62 (0.05)	50.37 (0.32)
	MP-M2	3.11	49.93 (0.17)	50.00 (5.65)	MP-M2	5.43	49.97 (0.07)	50.08 (0.58)
	MP-M3	3.08	49.93 (0.17)	50.00 (5.67)	MP-M3	5.44	49.97 (0.05)	50.08 (0.57)
	ПИ-M1	1.88	49.29 (0.15)	50.02 (4.13)	ПИ-M1	4.07	49.35 (0.13)	50.02 (7.27)
	ПИ-M2	8.69	49.52 (0.67)	50.22 (3.20)	ПИ-M2	8.07	49.62 (1.02)	50.14 (4.15)
	ПИ-M3	8.78	49.54 (0.67)	50.22 (3.18)	ПИ-M3	8.07	49.63 (1.02)	50.14 (4.13)
$y_2$ 79.3 м <sup>3</sup> /ч	MP-M1	3.66	79.25 (0.10)	79.40 (0.57)	MP-M1	2.80	78.96 (0.08)	79.36 (1.37)
	MP-M2	1.68	79.13 (0.10)	79.43 (0.20)	MP-M2	2.30	79.01 (0.17)	79.35 (1.48)
	MP-M3	1.54	79.08 (0.07)	79.42 (0.22)	MP-M3	2.34	79.03 (0.17)	79.34 (1.52)
	ПИ-M1	9.57	79.04 (4.55)	80.16 (0.58)	ПИ-M1	9.27	77.98 (0.43)	79.60 (1.92)
	ПИ-M2	8.73	78.94 (0.10)	80.14 (0.58)	ПИ-M2	2.63	77.31 (0.40)	79.67 (1.93)
	ПИ-M3	8.71	78.95 (0.10)	80.14 (0.53)	ПИ-M3	2.63	77.29 (0.40)	79.70 (1.75)
$y_3$ 126,5 м <sup>3</sup> /ч	MP-M1	2.29	126.11 (1.03)	128.59 (0.05)	MP-M1	2.58	124.48 (0.05)	126.91 (0.43)
	MP-M2	1.39	126.10 (0.87)	127.11 (0.78)	MP-M2	1.63	126.09 (0.78)	127.00 (0.87)
	MP-M3	0.93	125.93 (0.03)	127.07 (0.20)	MP-M3	0.93	126.29 (0.18)	126.97 (0.03)
	ПИ-M1	9.81	121.91 (3.53)	131.62 (2.57)	ПИ-M1	9.72	120.42 (2.05)	129.96 (0.93)
	ПИ-M2	9.58	123.03 (1.08)	132.53 (2.62)	ПИ-M2	9.56	119.38 (1.82)	131.07 (3.37)
	ПИ-M3	9.51	123.29 (1.05)	132.51 (2.60)	ПИ-M3	9.58	119.67 (1.80)	130.90 (3.35)
$y_4$ 14 м <sup>3</sup> /ч	MP-M1	3.71	13.63 (1.67)	14.55 (0.02)	MP-M1	3.45	13.72 (0.30)	14.67 (0.02)
	MP-M2	1.94	13.92 (1.15)	14.70 (0.82)	MP-M2	1.99	13.85 (0.95)	14.57 (0.80)
	MP-M3	1.35	13.71 (0.18)	14.24 (0.58)	MP-M3	0.95	13.49 (0.22)	14.55 (0.05)
	ПИ-M1	9.81	9.41 (3.53)	19.12 (2.57)	ПИ-M1	9.72	7.92 (2.05)	17.46 (0.93)
	ПИ-M2	9.58	10.53 (1.08)	20.03 (2.62)	ПИ-M2	9.56	6.88 (1.82)	18.57 (3.37)
	ПИ-M3	9.51	10.79 (1.05)	20.01 (2.60)	ПИ-M3	9.58	7.17 (1.80)	18.40 (3.35)

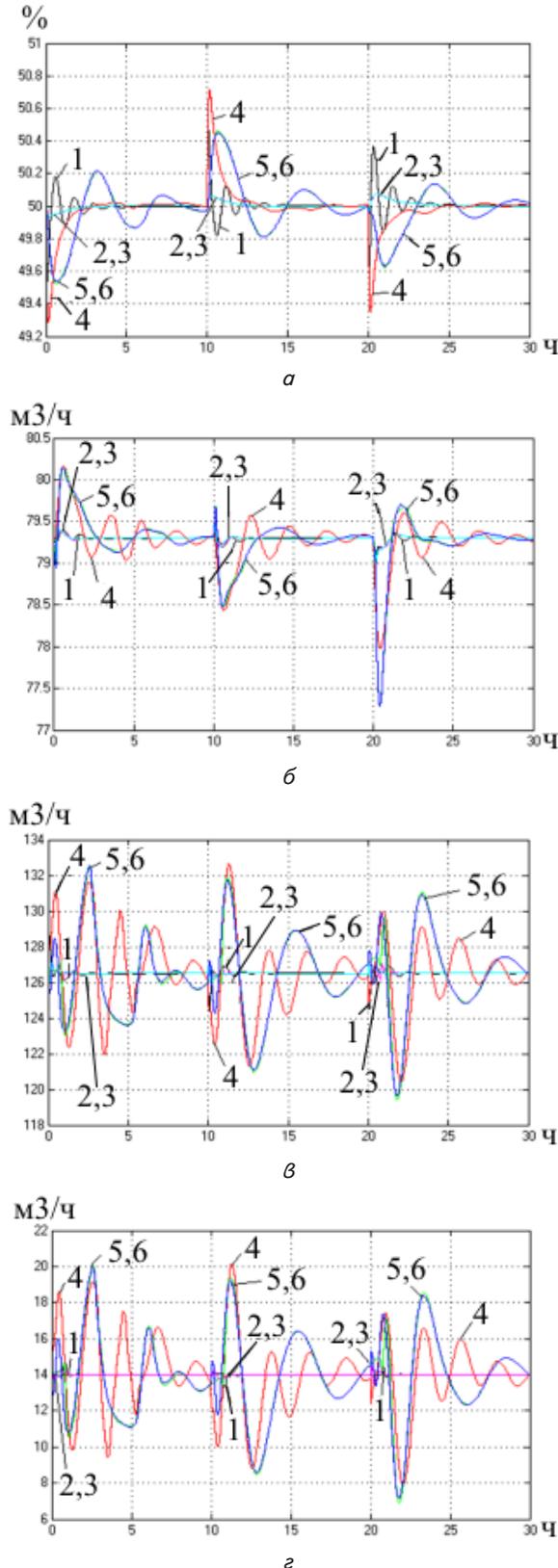


Рис. 3. Переходные процессы замкнутых систем управления при управлении по возмущению:

1 — однородная система с  $M_1$ , 2 — однородная система с  $M_2$ , 3 — однородная система с  $M_3$ , 4 — децентрализованная система с  $M_1$ , 5 — децентрализованная система с  $M_2$ , 6 — децентрализованная система с  $M_3$ :  
 $a - \Delta y_1$ ;  $б - \Delta y_2$ ;  $в - \Delta y_3$ ;  $г - \Delta y_4$

Таблица 4

Результаты моделирования – управляющие воздействия

САУ	f, %	$ u_1 _{\max}$ , %	$ u_2 _{\max}$ , %	$ u_3 _{\max}$ , %	$ u_4 _{\max}$ , %
MP-M1	5 5 5 5	5.5481	5.2841	7.1716	5.4701
MP-M2	5 5 5 5	5.2492	5.2299	5.2685	5.0351
MP-M3	5 5 5 5	5.2389	5.2340	5.2271	5.0351
ПИ-M1	5 5 5 5	5.1647	5.9652	17.8059	50
ПИ-M2	5 5 5 5	7.0247	6.0354	14.7174	50
ПИ-M3	5 5 5 5	7.0475	6.0249	14.6200	50
MP-M1	5 –5 –5 5	6.4892	5.2934	6.6665	9.5535
MP-M2	5 –5 –5 5	6.6874	5.0183	5.0465	5.2400
MP-M3	5 –5 –5 5	6.7077	5.0085	5.0465	5.2414
ПИ-M1	5 –5 –5 5	4.7571	6.8641	17.6682	50
ПИ-M2	5 –5 –5 5	6.9003	8.1571	29.1904	50
ПИ-M3	5 –5 –5 5	6.9148	8.1193	29.0884	50

Представленные результаты математического моделирования показывают, что разработанная многомерная система управления (регулятор МР) полностью удовлетворяет требованию робастности (изменяемые модели М1, М2, М3, табл. 3) и имеет достаточный запас по управляющим воздействиям (табл. 4). В сравнении с децентрализованной промышленной системой управления (ПИ-регуляторы) отклонение управляющих воздействий и управляемых переменных является значительно меньшим, что свидетельствует о преимуществе разработанной системы.

## 6. Обсуждение результатов разработки и исследования САУ РК

Использование многомерных регуляторов для управления ректификационными колоннами повышает качество управления за счет учета многосвязности объекта управления, что подтверждается результатами математического моделирования замкнутых систем управления на базе ПИД и МРС регуляторов без ограничений на примере трех ректификационных колонн в работе [13]. В работе [14] проиллюстрированы результаты математического моделирования децентрализованной системы автоматического регулирования нефтяной ректификационной колонной на базе ПИД регуляторов в пакете HYSYS, которые подтверждают значительную величину перерегулирования в системах на базе ПИД регуляторов. В работе [6] преимущество многомерных регуляторов подтверждается на примере внедрения реальной системы регулирования на базе коммерческой реализации МРС регулятора нефтя-

ной ректификационной колонной К-2 корпорации Turkish Petroleum Refineries с использованием алгоритма SMOСPro. Два месяца тестирования системы регулирования показали, что поддержание норм выхода продуктов ректификационной колонны существенно улучшилось.

В качестве дополнительных исследований возможно предложить проверить предложенный подход на нефтяных ректификационных колоннах разных типов с использованием прямых и косвенных управляемых переменных. Также, целесообразно проверить робастность распространенных реализаций модельно-прогнозирующих регуляторов с помощью предложенного автором подхода.

Результаты исследования могут быть использованы разработчиками систем автоматизации технологическими процессами нефтепереработки, а также другими классами сложных многомерных и многосвязных объектов управления, в которых остро стоит проблема робастности системы автоматического управления, а также в учебном процессе вузов.

## 7. Выводы

Определены переменные ректификационной колонны К-2, которые определяют ее материальный баланс и подлежат стабилизации для получения высококачественных продуктов переработки сырой нефти.

Получены экспериментальные динамические характеристики РК К-2, на основе которых создан набор из четырех моделей динамики – сложной М<sub>1</sub>, аппроксимированных М<sub>2</sub> и М<sub>3</sub>, грубой редуцированной М<sub>4</sub>.

Выбрана структура САУ РК, включающая регулятор состояния, наблюдатель и цифровой интегратор и обеспечивающая высокое качество переходных процессов с учетом робастности при простоте технической реализации.

Разработана методика определения параметров регулятора и наблюдателя состояния в предложенной структуре системы регулирования, заключающаяся в том, что параметры регулятора определяются на основе критерия оптимальности с указанным методом выбора его параметров, а для определения параметров наблюдателя состояния предложено использовать метод размещения полюсов. Причем, регулятор и наблюдатель разрабатываются на основе грубой модели М<sub>4</sub> с минимальным числом состояний.

Проведено исследование качества функционирования разработанной САУ РК, которое показало преимущество разработанной системы перед классической децентрализованной системой управления базе ПИ-регуляторов.

Разработанный цифровой регулятор также рекомендуется в качестве альтернативы предлагаемым ведущими в мировой нефтегазовой промышленности фирмами значительно более сложным и менее робастным многомерным модельно-прогнозирующим регуляторам.

## Литература

1. Seborg, D. E. Process Dynamics and Control [Text] / D. E. Seborg, D. A. Mellichamp, T. F. Edgar, F. J. Doyle. – New York, USA: John Wiley & Sons, 2011. – 528 p.

2. Skogestad, S. Multivariable Feedback Control [Text] / S. Skogestad, I. Postlethwaite. – Chichester, England: John Wiley & Sons, 2001. – 572 p.
3. Kwakernaak, H. Linear Control Systems [Text] / H. Kwakernaak, R. Sivan. – New York, USA: John Wiley & Sons, 1972. – 25 p.
4. Doyle, J. C. Guaranteed Margins for LQG Regulators [Text] / J. C. Doyle // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1978. – Vol. 23, Issue 4. – P. 756–757. doi: 10.1109/tac.1978.1101812
5. Razmjooy, N. Using LQG/LTR optimal control method for car suspension system [Text] / N. Razmjooy, M. Ramezani, E. Nazari // SCRO research annual report. – 2015. – Vol. 3. – P. 1–8.
6. Kemaloglu, S. Model predictive control of a crude distillation unit an industrial application [Text] / S. Kemaloglu, E. O. Kuzu, D. Gokce, O. Cetin // Proc. of 7th IFAC International Symposium on Advanced Control of Chemical Processes, 2009. – P. 880–885. doi: 10.3182/20090712-4-tr-2008.00144
7. Hovland, S. Stability of model predictive control based on reduced-order models [Text] / S. Hovland, C. Lovaas, J. T. Gravdahl, G. C. Goodwin // 47th IEEE Conference on Decision and Control, 2008. – P. 4067–4072. doi: 10.1109/cdc.2008.4738957
8. Bemporad, A. Robust model predictive control: A survey [Text] / A. Bemporad, M. Morari // Lecture Notes in Control and Information Sciences. – 1999. – Vol. 245. – P. 207–226. doi: 10.1007/bfb0109870
9. Веремей, Е. И. Пособие "Model Predictive Control Toolbox" [Электронный ресурс] / Е. И. Веремей, В. В. Еремеев, М. В. Сорникова. – Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/modelpredict>
10. Kanjanawanishkul, K. LQR and MPC controller design and comparison for a stationary self-balancing bicycle robot [Text] / K. Kanjanawanishkul // Kybernetika. – 2015. – Vol. 51. – P. 173–191. doi: 10.14736/kyb-2015-1-0173
11. Стопакевич, А. А. Системный анализ и теория сложных систем управления [Текст] / А. А. Стопакевич. – Одесса: Астропринт, 2013. – 352 с.
12. Kautsky, J. Robust Pole Assignment in Linear State Feedback [Text] / J. Kautsky, N. K. Nichols // International Journal of Control. – 1985. – Vol. 41, Issue 5. – P. 1129–1155. doi: 10.1080/0020718508961188
13. Sivakumar, R. Design and Development of Model Predictive Controller for Binary Distillation Column [Text] / R. Sivakumar, S. Mathew // International Journal of Science and Research (IJSR). – 2013. – Vol. 2. – P. 445–451.
14. Gonçalves, D. D. Dynamic Simulation and Control: Application to Atmospheric Distillation Unit of Crude Oil Refinery [Text] / D. D. Gonçalves, F. G. Martins, S. F. de Azevedo // 20th European Symposium on Computer Aided Process Engineering. – 2010. – Vol. 28. – P. 445–451.