

УДК 681.518

*В.Е. Попадко¹, e-mail: pve@gubkin.ru; Р.Л. Барашкин¹, e-mail: barashkin.r@gubkin.ru;**О.Д. Антипов¹, e-mail: antipov.o@gubkin.ru; С.О. Коновалов², e-mail: konovalov.sergey.o@gmail.ru*¹ Кафедра автоматизации технологических процессов РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина (Москва, Россия)² ПАО «Газпром автоматизация» (Москва, Россия)

Применение имитационного моделирования для синтеза структуры системы автоматического управления многосвязным объектом на примере установки комплексной подготовки газа

Одним из путей решения задачи повышения эффективности эксплуатации сложных технологических процессов является учет многосвязности объектов управления на этапе проектирования АСУ ТП. В статье рассматривается применение метода расчета матрицы относительных коэффициентов усиления и аппарата сингулярного анализа для оценки взаимовлияния входных и выходных параметров и синтеза структуры управления многосвязным объектом (MIMO – multi-input multi-output).

С помощью имитационной модели колонны регенерации диэтиленгликоля установки комплексной подготовки газа с точки зрения эффективности технологии исследованы различные структуры системы автоматического управления. На основе проведенного анализа технологического процесса выбраны структуры системы управления для оценки с помощью методов исследования многосвязных объектов. Определены матрица относительных коэффициентов усиления RGA (Relative Gain Array) и матрица сингулярных чисел для MIMO-систем размерностью 2x2 и 6x6. На основе анализа полученных матриц определена возможность развязки многосвязного объекта управления с помощью одноконтурных систем автоматического регулирования (SISO – single-input single-output).

Сравнивается возможность полной развязки колонны регенерации диэтиленгликоля для исследованных MIMO-систем размерностью 2x2 и 6x6, полученный вывод проверяется вычислением числа обусловленности.

Полученная структура системы автоматического управления колонны регенерации диэтиленгликоля используется в компьютерном тренажерном комплексе процессов подготовки нефти и газа к транспорту, разработанном в РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина. Разработанный тренажер предназначен для формирования практических навыков управления технологическими процессами нефтегазовой отрасли у оперативного персонала.

Ключевые слова: многосвязный объект управления, колонна регенерации ДЭГ, установка комплексной подготовки газа, матрица относительных коэффициентов усиления, аппарат сингулярного анализа.

.....

*V.E. Popadko¹, e-mail: pve@gubkin.ru; R.L. Barashkin¹, e-mail: barashkin.r@gubkin.ru;**O.D. Antipov¹, e-mail: antipov.o@gubkin.ru; S.O. Konovalov², e-mail: konovalov.sergey.o@gmail.ru*¹ Department of Process Control, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (Moscow, Russia)² Gazprom avtomatizatsiya PJSC (Moscow, Russia)

Usage of simulation for gas plant multivariable control system structure design

One of ways to solve the problem of increasing complex plants operational efficiency is to account for multivariable nature of the plant in the distributed control system design phase. The article is dedicated to the process of Relative Gain Array and Singular Value Matrix calculation for plants input and output parameters interaction analysis and MIMO (multiple input, multiple output) control system structure design.

Performance indicators of various glycol desorption column control system structures were assessed with use of built dynamic simulation model. Examination of technological process was performed to choose the set of candidate control system structures to evaluate with multivariable analysis techniques. The Relative Gain Arrays and Singular Values Matrices for 2x2 and 6x6 MIMO plant cases were determined. The problem of decoupling with SISO (single input, single output) control loops was studied based on obtained matrices.

Possibilities for full decoupling of glycol desorption column control loops were compared for 2x2 and 6x6 MIMO plant cases, the result was verified via Condition Number calculation.

Finally chosen control system structure was used to control glycol desorption column in operator training simulator, which was developed in Gubkin Russian State University of Oil and Gas. The simulator is dedicated to operating personnel practical control skills shaping in petroleum area.

Key words: multivariable plant, glycol desorption column, gas plant, relative gain array, singular value analysis.

Большинство установок топливной и химической промышленности с точки зрения теории управления представляют собой объекты управления (ОУ) с множеством входов и выходов (MIMO – multi-input multi-output) с сильным взаимовлиянием параметров. Многосвязность предъявляет особые требования к системам автоматического управления (САУ) такими объектами. В настоящее время существуют различные высокотехнологичные решения для управления сложными объектами промышленных комплексов с учетом их многосвязности. При этом проектирование таких САУ представляет собой нетривиальную задачу и требует использования современных мето-

дов имитационного моделирования и синтеза структуры САУ. Применение инженеринговых методов на этапе проектирования позволяет оптимизировать капитальные затраты на оборудование, снизить затраты на модернизацию, выявить недостатки в конфигурации САУ на раннем этапе жизненного цикла объекта и обеспечить достижение желаемых производственных результатов во время эксплуатации одновременно со снижением операционных затрат за счет повышения качества автоматического управления объектом. На практике в качестве базовых проектов по автоматизации технологических процессов используют проверенные типовые решения (или аналогии с тако-

выми) без учета динамики поведения ОУ в конкретных условиях эксплуатации и взаимовлияния параметров процесса. Такой подход позволяет решать задачу управления объектом не самым эффективным способом.

В РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина в рамках разработки межкафедральным авторским коллективом компьютерного тренажерного комплекса (КТК) процессов подготовки нефти и газа к транспорту [1] создана имитационная модель установки комплексной подготовки газа, включающая: здание переключающей арматуры, цех осушки газа, блок насосов высокого давления, блок регенерации абсорбента, блок насосов высокого давления (рис. 1). В цех регенерации абсорбента входит колонна регенерации диэтиленгликоля (ДЭГ) (рис. 2), которая представляет собой многосвязный объект управления. На этапе проектирования САУ колонны регенерации анализировалось взаимовлияние входных и выходных параметров для всех возможных комбинаций SISO (single-input single-output) – систем с целью развязки выходов от входов и синтеза САУ колонны на базе одноконтурных систем автоматического регулирования (САР). Для оценки степени взаимовлияния входных и выходных параметров всех возможных SISO-систем и организации пар входов и выходов использовался метод расчета матрицы относительных коэффициентов усиления (RGA – Relative Gain Array) и метод сингулярных значений (SVA – Singular Value Analysis) [2].

Колонна регенерации диэтиленгликоля имеет 6 входных и 6 выходных параметров (рис. 3).

Матрица относительных коэффициентов усиления [3] колонны $\Lambda(K)$ определяется как:

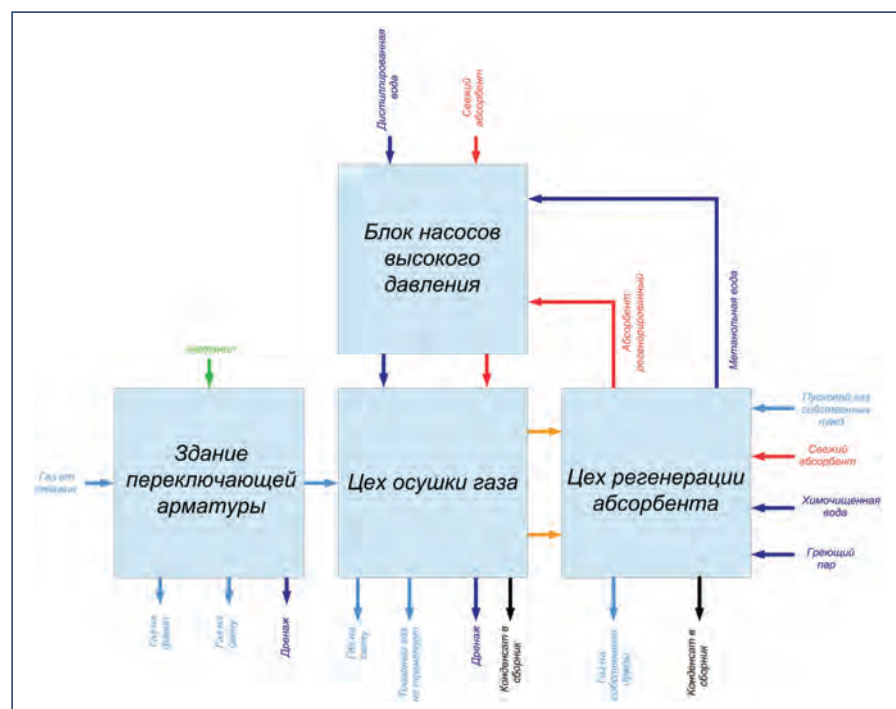


Рис. 1. Структурная схема установки комплексной подготовки газа
Fig. 1. Complex gas treatment plant structural schema

Ссылка для цитирования (for references):

Попадько В.Е., Барашкин Р.Л., Антипов О.Д., Коновалов С.О. Применение имитационного моделирования для синтеза структуры системы автоматического управления многосвязным объектом на примере установки комплексной подготовки газа // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2015. № 11. С. 22–28.

Popadko V.E., Barashkin R.L., Antipov O.D., Konovalov S.O. Usage of simulation for gas plant multivariable control system structure design. (In Russ.). *Territorija «NEFTEGAZ» = Oil and Gas Territory*, 2015, No. 11. P. 22–28.

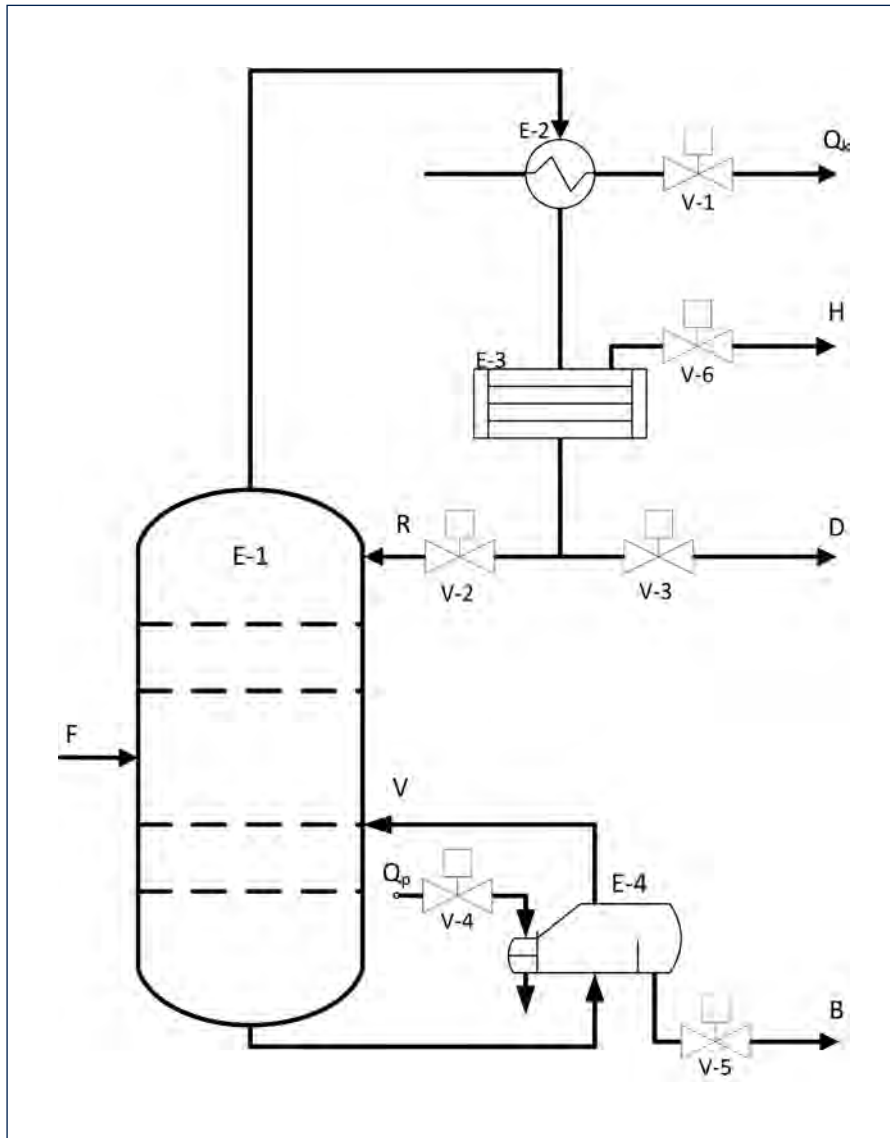


Рис. 2. Технологическая схема колонны регенерации диэтиленгликоля: E-1 – колонна; E-2 – конденсатор; E-3 – флегмовая емкость; E-4 – рибойлер; F – входной расход сырья; R – расход рефлюкса; H – расход газа из конденсатора на выветривание; D – расход дистиллята; B – расход кубового остатка; Q_к – отвод тепла от конденсатора; Q_р – подвод тепла к рибойлеру; V-1 – V-6 – регулирующие клапаны.

Fig. 2. Diethylene glycol regeneration column process layout:

E-1 – column; E-2 – condenser; E-3 – reflux drum; E-4 – reboiler; F – input raw-materials consumption; R – reflux flow; H – gas flow from condenser for weathering; D – distillate flow; B – bottoms liquid flow; Q_к – heat removal from condenser; Q_р – heat supply to reboiler; V-1 – V-6 – control valves

$$\Lambda(K) = K \otimes K^{-1}, \quad (1)$$

где K – матрица передаточных функций (математический оператор, определяющий динамическое поведение каждого из выходов при изменении каждого из входов колонны) в установившемся режиме, \otimes – поэлементное умножение. Элементы матрицы Λ – относительные

коэффициенты усиления $\lambda_{ij}(K)$ определяются как:

$$\lambda_{ij}(K) = \frac{(\partial y_i / \partial u_j)_u}{(\partial y_i / \partial u_j)_y}, \quad (2)$$

где $(\partial y_i / \partial u_j)_u$ – коэффициент усиления разомкнутого контура $y_i - u_j$ при изменении входного параметра u_j (остальные входы неизменны) и разомкнутых

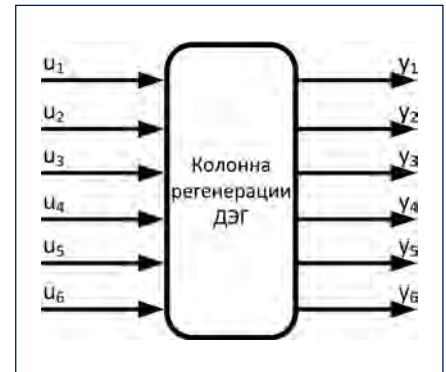


Рис. 3. Структурная схема колонны регенерации диэтиленгликоля как объекта управления:

u_1 – расход рефлюкса; u_2 – расход газа из конденсатора на выветривание; u_3 – расход дистиллята; u_4 – расход кубового остатка; u_5 – отвод тепла от конденсатора; u_6 – подвод тепла к рибойлеру; y_1 – качество РДЭГ; y_2 – качество дистиллята; y_3 – давление верху колонны; y_4 – температура в конденсаторе; y_5 – уровень в конденсаторе; y_6 – уровень в кубовой части колонны

Fig. 3. Structural flow chart of diethylene glycol regeneration column as the control object:

u_1 – reflux flow; u_2 – gas flow from condenser for weathering; u_3 – distillate flow; u_4 – bottoms liquid flow; u_5 – heat removal from condenser; u_6 – heat supply to reboiler; y_1 – recovered diethylene glycol quality; y_2 – distillate quality; y_3 – column overhead pressure; y_4 – condenser temperature; y_5 – condenser level; y_6 – level in the column bottom part

остальных контурах системы; $(\partial y_i / \partial u_j)_y$ – коэффициент усиления разомкнутого контура $y_i - u_j$ при изменении входного параметра u_j и замкнутых остальных контурах системы (остальные выходы неизменны).

В результате расчета элементов матрицы относительных коэффициентов усиления можно сделать следующие предварительные выводы:

1) при $\lambda_{ij} = 1$ на рассматриваемый выход i влияет только один рассматриваемый вход j . Связывание входного параметра с выходным через такую связь является наилучшим вариантом для построения одноконтурной САР;

2) при $\lambda_{ij} = 0$ на рассматриваемый выход i не влияет рассматриваемый вход j . Рассматриваемые параметры не подходят для построения одноконтурной САР;

Таблица 1. Структуры САУ колонны регенерации диэтиленгликоля
Table 1. Diethylene glycol regeneration column automatic control system structures

№ п/п структуры Structure No.	Выходные параметры Output parameters					
	Температура в конденсаторе Condenser temperature	Давление верха колонны Column overhead pressure	Уровень в конденсаторе Condenser level	Уровень в кубовой части колонны Level in the column bottom part	Качество дистиллята Distillate quality	Качество кубового продукта Bottom product quality
1	Q_k	H	D	R	B	Q_R
2	Q_k	H	D	Q_R	B	R
3	Q_k	H	R	D	B	Q_R
4	Q_k	H	R	B	D	Q_R
5	Q_k	H	B	R	D	Q_R
6	Q_k	H	B	Q_R	D	R
7	Q_k	H	Q_R	D	B	R
8	Q_k	H	Q_R	B	D	R
9	Q_k	H	D	R	Q_R	B
10	Q_k	H	D	Q_R	R	B
11	Q_k	H	R	D	Q_R	B
12	Q_k	H	R	B	Q_R	D
13	Q_k	H	B	R	Q_R	D
14	Q_k	H	B	Q_R	R	D
15	Q_k	H	Q_R	D	R	B
16	Q_k	H	Q_R	B	R	D
17	Q_k	H	D	B	Q_R	R
18	Q_k	H	D	B	R	Q_R
19	Q_k	H	B	D	R	Q_R
20	Q_k	H	B	D	Q_R	R
21	Q_k	H	R	Q_R	D	B
22	Q_k	H	R	Q_R	B	D
23	Q_k	H	Q_R	R	B	D
24	Q_k	H	Q_R	R	D	B

3) при $0 < \lambda_{ij} < 1$ величина λ_{ij} указывает степень влияния рассматриваемого входа на рассматриваемый выход. При $\lambda_{ik} = \lambda_{il} = 0,5$ два входа k, l в равной степени влияют на один выход i ;

4) при $\lambda_{ij} > 1$ на рассматриваемый выход оказывают влияние другие входы, и чем больше λ_{ij} , тем больше это влияние. При больших значениях λ_{ij} невозможно развязать входы и выходы;

5) при $\lambda_{ij} < 0$ на рассматриваемый выход оказывают противоположенное влияние другие входы. Система, полученная в результате замыкания связи с таким относительным коэффициентом усиления, может стать неустойчивой.

Таким образом, для построения контуров регулирования рекомендуется выбирать те пары входов и выходов, коэффициент

относительного усиления которых положительны и наиболее близок к единице. Для рассматриваемой колонны регенерации диэтиленгликоля с шестью входами и шестью выходами существует 720 различных комбинаций структуры САУ колонны. На практике не исследуют все возможные комбинации, а выбирают наиболее перспективные с точки зрения технологии. Для рассматриваемого примера давление верха колонны и температуру в конденсаторе регулируют расходом газа на выветривание из конденсатора (H) и отводом тепла от конденсатора (Q_k) соответственно. Таким образом, получаем MIMO-систему размерностью 4x4. Возможные варианты структур САУ такой MIMO-системы приведены в таблице 1.

РАССМОТРИМ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕННЫЕ СТРУКТУРЫ САУ КОЛОННЫ РЕГЕНЕРАЦИИ ДИЭТИЛЕНГЛИКОЛЯ:

- структуры № 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 19, 20, 23 и 24 неэффективны вследствие регулирования уровня в кубовой части продукта расходами рефлюкса или дистиллята (такая конфигурация априорно приводит к высокому запаздыванию в контуре и, как следствие, негативно сказывается на качестве и устойчивости переходных процессов в системе);
- структуры № 6, 8, 14, 19 неэффективны вследствие регулирования уровня в конденсаторе расходом кубового продукта или подводом тепла к ребойлеру (такая конфигурация априорно приводит к высокому запаздыванию в контуре

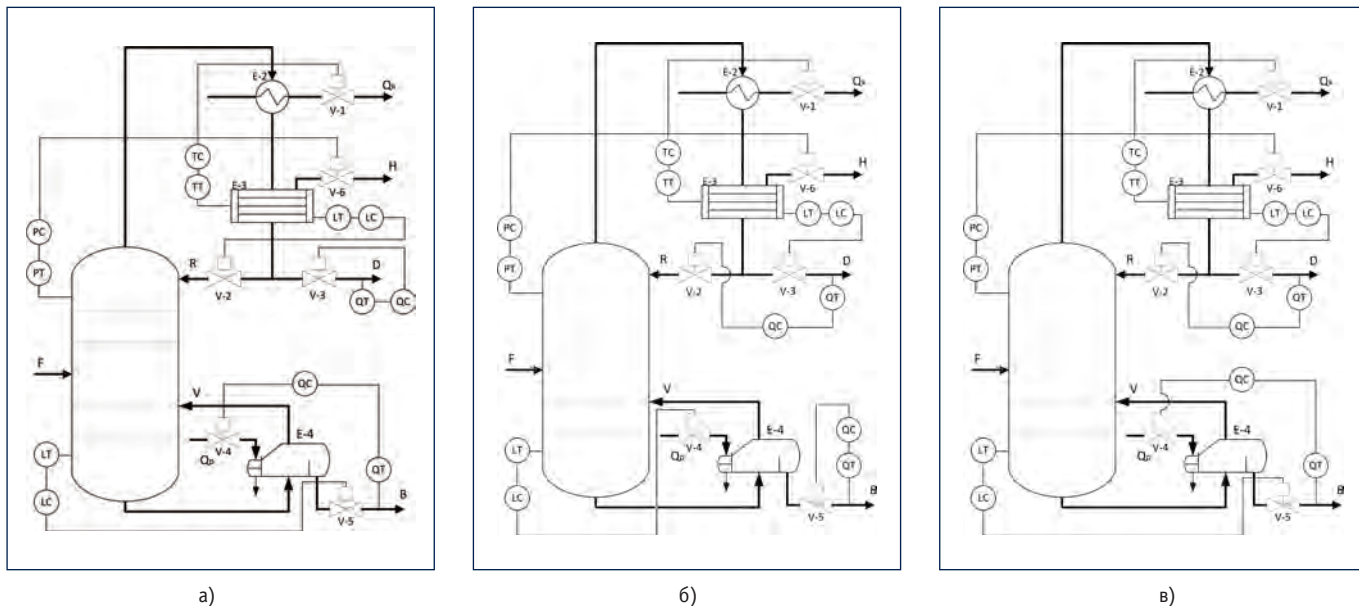


Рис. 4. Выбранные структуры САУ колонны регенерации диэтиленгликоля:

а) структура САУ № 4; б) структура САУ № 10; в) структура САУ № 18

Fig. 4. Chosen diethylene glycol regeneration column automatic control system (ACS) structures:

а) ACS structure No. 4; б) ACS structure No. 10; в) ACS structure No. 18

и, как следствие, негативно сказывается на качестве и устойчивости переходных процессов в системе);

- структуры № 21 и 22 не обеспечивают устойчивого положения равновесия между расходами дистиллята и кубового продукта, так как цели обоих контуров регулирования одновременно недостижимы из-за взаимовлияния одного контура на другой (оба контура приходят в насыщение);

- структуры № 2, 12, 17 неэффективны вследствие большого удаления регулируемого параметра от регулирующего (такая конфигурация априорно приводит к высокому запаздыванию в контуре и, как следствие, негативно сказывается на качестве и устойчивости переходных процессов в системе).

В результате анализа возможных вариантов структур САУ были выделены структуры № 4, 10, 18 (рис. 4 а, б, в). Как правило, на практике задача стабилизации уровня в конденсаторе и кубовой части колонны решается проще, чем стабилизация параметров качества. Кроме того, указанные группы параметров имеют существенно различные динамические свойства и могут быть эффективно разделены в частотной области. Поэтому для упрощения исследования контуры регулирования

уровней убираем из рассмотрения и сводим MIMO-систему к размерности 2x2. По свойствам матрицы относительных коэффициентов усиления [5] для расчета системы 2x2 необходимо экспериментальным путем получить значение лишь одного коэффициента λ_{11} .

В результате эксперимента на имитационной модели технологического процесса подготовки газа к транспорту были получены следующие матрицы относительных коэффициентов усиления для различных структур САУ колонны регенерации диэтиленгликоля:

1) для структуры № 4:

$$RGA = \begin{pmatrix} \lambda_{11} & 1-\lambda_{11} \\ 1-\lambda_{11} & \lambda_{11} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.796 & 1.796 \\ 1.796 & -0.796 \end{pmatrix}; \quad (3)$$

2) для структуры № 10:



$$RGA = \begin{pmatrix} 0.788 & 0.212 \\ 0.212 & 0.788 \end{pmatrix}; \quad (4)$$

3) для структуры № 18:

$$RGA = \begin{pmatrix} 0.722 & 0.278 \\ 0.278 & 0.722 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Вследствие наибольшей близости коэффициента λ_{11} к единице структура № 10 является лучшим вариантом развязки MIMO-системы.

Матрица сингулярных чисел [4] записывается следующим образом:

$$\Sigma = \begin{pmatrix} 0.007221 & 0 \\ 0 & 0.000637 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Отсюда число обусловленности равно:

$$CN = 11.33. \quad (7)$$

Так как $CN < 50$, то MIMO-систему можно развязать на независимые SISO-системы [5].

Таким образом, при реализации САУ для рассматриваемой колонны регенерации диэтиленгликоля рекомендуется качество дистиллята регулировать расходом рефлюкса, а качество кубового продукта регулировать расходом кубового продукта. В результате эксперимента на имитационной модели колонны регенерации диэтиленгликоля построена матрица от-

носительных коэффициентов усиления размерностью бхб без принятых ранее упрощений (формула (8)). Матрица RGA для MIMO-системы (8) вследствие выражения (1) запишется следующим образом (формула (9)). Запишем матрицу RGA (9) в виде таблицы 2.

В РЕЗУЛЬТАТЕ АНАЛИЗА МАТРИЦЫ RGA ПОЛУЧАЕМ СЛЕДУЮЩУЮ СТРУКТУРУ САУ:

- массовое содержание воды в кубовом продукте регулируется подачей тепла к рибойлеру ($\lambda = 0,3761$);
- массовое содержание ДЭГ в дистилляте регулируется расходом газа на выветривание из конденсатора ($\lambda = 0,4505$);
- давление верха колонны регулируется расходом газа на выветривание из конденсатора ($\lambda = 0,8952$);
- температура в конденсаторе регулируется отводом тепла от него ($\lambda = 0,1841$);
- уровень в конденсаторе регулируется отводом тепла от конденсатора ($\lambda = 0,9268$);

• уровень в рибойлере регулируется расходом рефлюкса, но при этом имеет значение λ очень близкое к нулю ($\lambda = 0,0019$).

Входные переменные «расхода газа на выветривание из конденсатора» и «отвод тепла от конденсатора» участвуют в двух контурах регули-

$$K = \begin{pmatrix} -4,7 \cdot 10^{-5} & -6,3 \cdot 10^{-5} & -4 \cdot 10^{-6} & -9,3 \cdot 10^{-6} & 8,44 \cdot 10^{-11} & -1,8 \cdot 10^{-8} \\ 3,49 \cdot 10^{-5} & 41 \cdot 10^{-5} & 5,63 \cdot 10^{-6} & 1,26 \cdot 10^{-5} & -5,2 \cdot 10^{-10} & 4,74 \cdot 10^{-9} \\ 0,07359 & -3,66474 & 72 \cdot 10^{-5} & 0,00232 & -4,1 \cdot 10^{-6} & 2,56 \cdot 10^{-5} \\ 3,07856 & -31,5883 & 0,005275 & 0,018 & -3,9 \cdot 10^{-5} & 31,7 \cdot 10^{-5} \\ 0,22809 & -3,36164 & -0,03919 & -0,08718 & -4,63 \cdot 10^{-5} & -1,1 \cdot 10^{-6} \\ -0,54287 & 32,3506 & -47,5638 & -106,176 & 3,52 \cdot 10^{-5} & -35 \cdot 10^{-5} \end{pmatrix} \cdot \quad (8)$$

$$RGA = \begin{pmatrix} -0.0445 & 0.0240 & -12.9317 & 13.5782 & -0.0020 & 0.3761 \\ -1.0103 & 0.4505 & 392.7721 & -395.0479 & -0.1402 & 3.9757 \\ -0.2350 & 0.8952 & -1.3491 & 1.9448 & 0.0308 & -0.2867 \\ 2.2840 & -0.4388 & -3.6768 & 5.6773 & 0.1841 & -3.0299 \\ 0.0039 & 0.0717 & -0.6741 & 0.6720 & 0.9268 & -0.0003 \\ 0.0019 & -0.0026 & -373.1405 & 374.1756 & 0.0006 & -0.0350 \end{pmatrix} \cdot \quad (9)$$

$$\Sigma = \begin{pmatrix} 121.085 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 30.871 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.297 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 15.87 \cdot 10^{-5} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 57.63 \cdot 10^{-9} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.13 \cdot 10^{-9} \end{pmatrix} \cdot \quad (10)$$

Программно-аппаратный комплекс для оцифровки и архивирования рентгеновских снимков

Array 2905 HD

ОПТИЧЕСКАЯ ПЛОТНОСТЬ
до 4,7 D

- соответствует классу DS по ISO 14096 (подтверждено сертификатом BAM)
- разрешение на архивирование снимков
- отсутствие необходимости хранения оригиналов снимков



ООО «Дельта НДТ.ру». Тел./факс (812) 244-3151
info@deltandt.ru, www.array2905HD.ru

Table 2. RGA matrix for MIMO-systems with dimension of 6x6

Таблица 2. Матрица RGA для MIMO-системы размерностью 6x6

Выход Output Вход Input	Расход рефлюкса Reflux flow	Расход газа из конденсатора на выветривание Gas flow from condenser for weathering	Расход дистиллята Distillate flow	Расход кубового продукта Bottom product flow	Отвод тепла от конденсатора Heat removal from condenser	Подвод тепла к рибойлеру Heat supply to reboiler
Массовое содержание воды в РДЭГ Water weight content in recovered diethylene glycol	-0,0445	0,0240	-12,9317	13,5782	-0,0020	0,3761
Массовое содержание ДЭГ в дистилляте Diethylene glycol weight content in distillate	-1,0103	0,4505	392,7721	-395,0479	-0,1402	3,9757
Давление верха колонны Column overhead pressure	-0,2350	0,8952	-1,3491	1,9448	0,0308	-0,2867
Температура в конденсаторе Condenser temperature	2,2840	-0,4388	-3,6768	5,6773	0,1841	-3,0299
Уровень в конденсаторе Condenser level	0,0039	0,0717	-0,6741	0,6720	0,9268	-0,0003
Уровень в рибойлере Reboiler level	0,0019	-0,0026	-373,1405	374,1756	0,0006	-0,0350

рования. Это говорит о том, что полная развязка колонны регенерации диэтиленгликоля невозможна, что также подтверждается при вычислении числа обусловленности. Матрица сингулярных чисел MIMO-системы 6x6 выглядит следующим образом (формула (10)).

Число обусловленности равно:

$$CN = \frac{121.085}{1.13 \cdot 10^{-9}} = 107.15 \cdot 10^9. \quad (11)$$

При $CN > 50$ считается, что полная развязка многосвязной системы считается невозможной. Большое число обусловленности говорит о невозможности полностью автономного управления колонной регенерации ДЭГ посредством SISO-систем, и при управлении установкой регенерации ДЭГ следует использовать методы усовершенствованного управления технологическим процессом.

Таким образом, в результате решения задачи синтеза структуры системы автоматического управления многосвязного объекта с использованием имитационного моделирования была выбрана структура САУ для упрощенной MIMO-системы размерностью 2x2. При синтезе САУ для MIMO-системы 6x6 было показано, что полная развязка системы на SISO-системы невозможна.

Литература:

1. Барашкин Р.Л., Калашников П.К., Попадко В.Е., Пятибратов П.В. Компьютерный тренажерный комплекс процессов подготовки нефти и газа к транспорту // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2015. № 5. С. 27–31.
2. Seborg D.E., Edgar T.F., Mellichamp D.A., Doyle F.J. Process Dynamics and Control. Wiley, 3rd ed., 2011. 514 pp.
3. Chen D., Seborg D. E. Relative Gain Array Analysis for Uncertain Process Models. AIChE J., 2002, Vol. 48. P. 302–310.
4. Laub A. J., Matrix Analysis for Scientists and Engineers. SIAM, Philadelphia, PA, 2004.
5. Skogestad S., Postlethwaite I., Multivariable Feedback Control. 2d ed. Wiley, New York, 2005.

References:

1. Barashkin R.L., Kalashnikov P.K., Popadko V.E., Pyatybratov P.V. Komp'yuternyj trenazhernyj kompleks processov podgotovki nefiti i gaza k transportu [Oil and Gas Treatment Processes for Further Transportation Computer Simulator]. *Territorija «NEFTEGAZ» = Oil and Gas Territory*, 2015, № 5. P. 27–31.
2. Seborg D.E., Edgar T.F., Mellichamp D.A., Doyle F.J. Process Dynamics and Control. Wiley, 3rd ed., 2011. 514 pp.
3. Chen D., Seborg D. E. Relative Gain Array Analysis for Uncertain Process Models. AIChE J., 2002, Vol. 48. P. 302–310.
4. Laub A. J., Matrix Analysis for Scientists and Engineers. SIAM, Philadelphia, PA, 2004.
5. Skogestad S., Postlethwaite I., Multivariable Feedback Control. 2d ed. Wiley, New York, 2005.