

# Проектирование и сравнительный анализ структур системы управления на примере блока предварительной сепарации газа

Р. Л. Барашкин<sup>1</sup>, В. Е. Попадько<sup>2</sup>

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина

<sup>1</sup>barashkin.r@gubkin.ru, <sup>2</sup>pve@gubkin.ru

**Аннотация.** Рассматривается применение методики определения числа степеней свободы для проектирования структуры системы управления на примере блока предварительной сепарации. С помощью выбранной методики рассчитывается максимальное и минимальное число степеней свободы управления. Предлагается шесть альтернативных вариантов структур системы управления с разным числом задействованных степеней свободы. Проводится сравнительный анализ предложенных структур с помощью показателя чувствительности с одновременной подачей нескольких возмущающих воздействий. Делаются выводы об эффективности предложенных структур системы управления и целесообразности использования методики определения числа степеней свободы управления для решения задач проектирования.

**Ключевые слова:** проектирование структуры системы управления; число степеней свободы управления; динамическое моделирование; управление технологическими процессами; блок сепарации газа

## I. ВВЕДЕНИЕ

При проектировании систем управления для непрерывных технологических процессов (ТП) требуется предусмотреть на этапе эксплуатации обеспечение требуемого уровня безопасности [17] и качества продукции [18]. При классическом проектировании на первом этапе подбирается оборудование и номинальный режим ТП [4]. На следующем этапе для рассчитанных стационарных проектных режимов без учета динамических свойств объекта управления предлагается структура системы управления (СУ) ТП [6]. На этапе пуско-наладки завода осуществляется доработка и тонкая настройка параметров системы управления ТП. Данная последовательность проектирования зарекомендовала себя на практике последовательной и доступной для разных уровней специалистов проекта.

При ужесточении требований к качеству продукции, усложнении условий эксплуатации технологических процессов и изменении карты режимов классический подход к проектированию перестал удовлетворять качеством получаемых результатов и сроками сдачи комплексных проектов по автоматизации [16]. Появляются первые обобщающие теоретические работы [10] и на практике внедряются методики комплексного проектирования систем управления сложными технологическими установками [13].

Такие методики позволяют на начальном этапе проектирования технологического процесса определять требуемое число контуров регулирования, выбирать точки измерения технологических параметров, необходимое число регулирующих параметров, устанавливать характерные связи между регулируемыми и регулируемыми параметрами с учетом требуемых характеристик системы управления заводом в целом [1].

В данной работе на примере типового непрерывного технологического процесса нефтегазовой отрасли блока предварительной сепарации, включающего два последовательных сепаратора, исследуется достаточность методики определения степеней свободы [8] для проектирования структуры СУ, обеспечивающей минимум показателя чувствительности к возмущающим воздействиям (ЧВВ), предложенного в работе [9].

## II. МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

### A. Методика определения числа степеней свободы управления

Проектирование комплексных ТП рекомендуется начинать с определения числа степеней свободы управления (ЧССУ) [15]. Значение ЧССУ определяет максимальное количество возможных контуров регулирования для управления рассматриваемым ТП. При этом не обязательно задействовать все степени свободы. Существуют различные методики расчета ЧССУ [14]. В общем случае число степеней свободы определяется разницей между количеством независимых переменных и количеством уравнений [7]. В данном исследовании используется формула (1) для определения ЧССУ, рассмотренная в работе [8].

$$\text{ЧССУ} = N_{0ч} - N_{пч} - N_{ич}, \quad (1)$$

где  $N_{0ч}$  – общее число потоков на технологической схеме (материальные, энергетические, механические, электрические);  $N_{пч}$  – предельное число потоков, которыми нельзя одновременно манипулировать по причине их жесткой взаимосвязанности (однофазные потоки с несжимаемыми средами). В работе [8] для типовых объектов технологических процессов приводятся значения предельных чисел;  $N_{ич}$  – избыточное число потоков, которыми не рекомендуется управлять с точки зрения опыта эксплуатации ТП и эмпирических закономерностей.

**В. Оценка качества регулирования многоконтурных систем управления с помощью показателя чувствительности к возмущающим воздействиям**

Качество управления одноконтурных систем автоматического регулирования оценивается с помощью классических показателей точности, запаса устойчивости, быстродействия и интегральных критериев [3]. Для оценки качества многоконтурной системы управления многосвязного объекта управления воспользуемся показателем ЧВВ [9], который рассчитывается как интеграл по времени разницы входных и выходных молярных расходов ( $A_i$ ) по каждому компоненту ( $n$ ) всех объектов регулирования ( $k$ ) до момента выхода на установившийся режим ( $t_s$ ):

$$\text{ЧВВ} = \int_0^{t_s} \left( \sum_k \left( \sum_i^n A_i \right) \right) dt.$$

**С. Методика выбора структуры системы управления**

На основе расчета ЧССУ определяется максимально возможное число контуров регулирования. Задается число ЧССУ, которые будут задействованы в конкретной реализации структуры СУ. Выбираются регулируемые и регулирующие параметры [12]. Предлагаются различные комбинации связи регулируемых и регулирующих параметров. В результате получается набор альтернативных структур СУ с различным количеством контуров регулирования и различными связями между регулируемыми и регулиющими параметрами.

Для сравнения альтернативных структур СУ проводятся эксперименты с использованием динамической имитационной модели ТП. Подаются возмущающие воздействие на объект управления в динамической модели ТП и рассчитывается ЧВВ для каждой структуры СУ. Выбирается та структура, у которой ЧВВ минимален.

**III. ПРИМЕР ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ**

**А. Описание технологического процесса**

В качестве исследуемого технологического процесса выбран фрагмент блока первой ступени сепарации установки подготовки нефти к транспорту (УПН) (рис. 1). Газонасыщенная нефть через поток 1 поступает с месторождения под давлением в нефтегазосепаратор (НС), где происходит разделение на нефтяную и газовую фракцию. Далее нефть через поток 3 направляется в блок предварительного отстоя. Газовая фракция через поток 2 поступает в газосепаратор (ГС) для дальнейшего отделения нефтяной составляющей от газовой. Через поток 4 газ из газосепаратора отправляется на сборочный коллектор газоперерабатывающего завода (ГПЗ). Жидкая фаза из ГС через поток 5 подается в дренажную ёмкость для накопления и вторичной подачи на вход УПН.

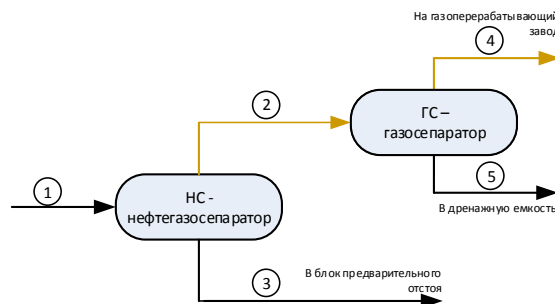


Рис. 1. Фрагмент технологической схемы блока первой ступени сепарации установки подготовки нефти к транспорту

**В. Динамическая имитационная модель**

В данном исследовании применялся цикл разработки динамических имитационных моделей ТП (рис. 2), подробно рассмотренный в работе [2].

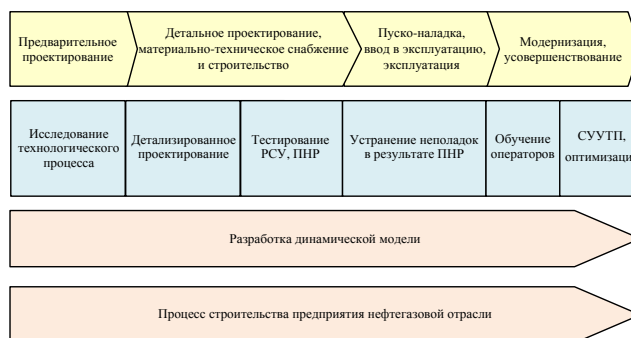


Рис. 2. Жизненный цикл динамических имитационных моделей

В пакете имитационного моделирования в динамическом режиме разработана схема ТП (рис. 3) со следующим компонентным составом флюида на входе в блок (молярные доли) [5]: вода (0,39), углекислый газ (0,0002), хлор (0,004), азот (0,0015), метан (0,13), этан (0,005), пропан (0,011), и-бутан (0,008), н-бутан (0,02), и-пентан (0,013), н-пентан (0,024), н-гексан (0,3933).

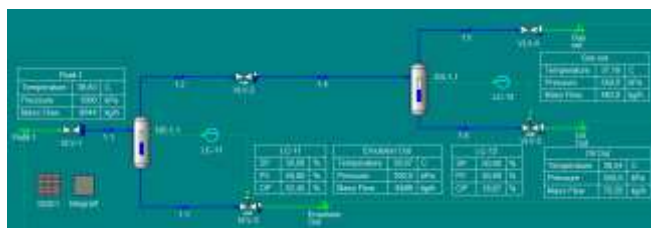


Рис. 3. Схема технологического процесса в пакете имитационного моделирования

В имитационной модели использовались следующие параметры технологического оборудования:

- объем сепаратора, м<sup>3</sup>: НС – 14, ГС – 14;
- пропускная способность клапана, галлон/мин: VLV-1 – 33, VLV-2 – 30, VLV-3 – 23, VLV-4 – 18, VLV-5 – 0.3;
- скорость перемещения штока для всех клапанов задана одинаковой, %/мин – 3.

Параметры настройки и заданные значения регуляторов приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1 НАСТРОЙКИ РЕГУЛЯТОРОВ

Имя	Кс	Ti, [мин]	SP
LC-11, LC-21, LC-31, LC-41, LC-51, LC-62	4	0.9	50 [%]
LC-12, LC-23, LC-33, LC-43, LC-54, LC-65	50	3	50 [%]
PC-22, PC-32, PC-53, PC-64	5	0.1	860 [кПа]
PC-42	5	1	875 [кПа]
PC-52, PC-63	5	0.1	875 [кПа]
FC-61	0.3	0.3	8900 [кг/ч]

### С. Определение числа степеней свободы управления

Для определения ЧССУ по формуле (1) найдем общее число потоков  $N_{Oч}$ . Для ТП, приведенного на рис. 1  $N_{Oч}=5$ . Предельное число потоков  $N_{Пч}$  для сепараторов по методике [8] равно 0. В качестве избыточного числа  $N_{Ич}$  рассмотрим потоки 1, 2, 4. Управление потоком 1 может создавать нежелательные возмущающие воздействия на объекты, расположенные до НС. Наличие гидравлической связи потоков 2 и 4 позволяет предположить управление только одним из них. Таким образом, максимальное число избыточных потоков  $N_{Ич}=2$ .

Определим ЧССУ по формуле (1):

$$\text{ЧССУ} = 5 - 0 - 2 = 3.$$

В результате получаем оценку минимального и максимального ЧССУ, равные 3 и 5 соответственно. Проведём анализ достоверности полученного ЧССУ для выбора структуры СУ. Рассмотрим различные структуры СУ и проанализируем качество управления.

### Д. Альтернативные структуры системы управления

Рассмотрим структуры систем управления с различным числом контуров от 2 до 5 (рис. 4). Выполним анализ с помощью динамического моделирования каждой структуры.

Так как уровни границ раздела фаз между газом и жидкостью в НС и ГС относятся к типовому интегрирующему звену без самовыравнивания, то для предотвращения опустошения или перелива во всех структурах будут использоваться регуляторы уровня. Парные переменные для этих регуляторов выбираются с учетом максимального коэффициента усиления между регулируемыми и регулируемыми параметрами [11].

В «Структуре СУ 1» (рис. 4,а) используются только два регулятора уровня, что меньше рекомендуемого ЧССУ, равного трём. Давление не регулируется.

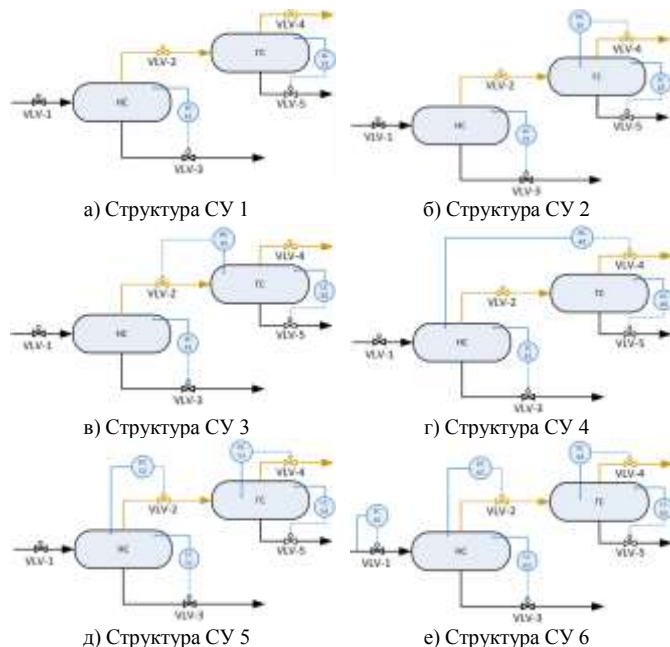


Рис. 4. Комбинации структур системы управления рассматриваемого ТП

В «Структуре СУ 2» (рис. 4,б) добавляется регулятор давления в ГС, управляющий клапаном VLV-4. В «Структуре СУ 3» (рис. 4,в) давление в ГС регулируется с помощью клапана на входе VLV-2. В «Структуре СУ 4» (рис. 4,г) давление в НС регулируется с помощью клапана VLV-4 на выходе ГС. В «Структуре СУ 5» (рис. 4,д) давление в НС и ГС стабилизируется отдельными регуляторами с помощью клапанов VLV-2 и VLV-4. В «Структуре СУ 6» (рис. 4,е) используется пять регуляторов, равное максимальному значению рассчитанного ЧССУ, где к регуляторам уровня и давления добавляется регулятор расхода на входе в НС.

### Е. Сравнение качества регулирования предложенных структур систем управления

Сравнительный анализ предложенных структур систем управления выполним с помощью одновременной подачи следующих четырёх возмущающих воздействий: давления на входе в НС, давления на выходе НС и двух давлений на выходе ГС. Несмотря на малую вероятность одновременного возникновения на реальном ТП сразу четырёх возмущающих воздействий, это исследование позволит комплексно сравнить качество регулирования предложенных структур СУ.

Необходимо отметить, что динамика переходных процессов будет существенно зависеть от начального состояния ТП. В данном эксперименте давление на входе НС меняется с 1000 кПа до 1050 кПа, давление жидкой фазы на выходе НС меняется с 700 до 650, давление газовой и жидкой фаз на выходе ГС меняется с 550 до 500 кПа.

На рис. 5 приведены графики зависимости изменения показателя ЧВВ во времени для предложенных структур СУ.

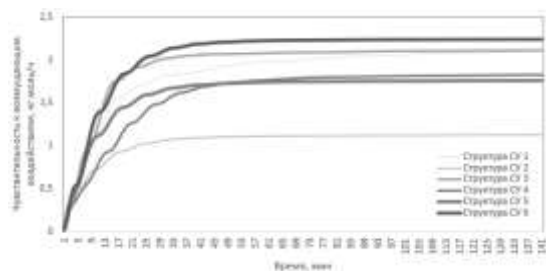


Рис. 5. Зависимость изменения показателя чувствительности СУ к возмущающим воздействиям во времени

Чем меньше абсолютное значение показателя ЧВВ в установившемся режиме, тем более эффективнее предложенная структура СУ устраняет влияние возмущающих воздействий на объект регулирования. В табл. 2 приведены сводные значения ЧВВ для предложенных структур СУ. Наименьшее значение ЧВВ у «Структуры СУ 2» с тремя ЧССУ. При этом с таким же числом ЧССУ структуры СУ распределились на 3 и 5 позициях. Наихудшее значение ЧВВ у «Структуры СУ 6» с максимальным ЧССУ равным 5.

В «Структуре СУ 1» число регуляторов СУ равно двум, что меньше минимального рассчитанного ЧССУ. Данная структура устойчива к возмущающим воздействиям, но не поддерживает заданный режим эксплуатации, что соответствует теории.

ТАБЛИЦА II Значения ЧВВ для структур СУ

№	Структура СУ	ЧВВ	ЧССУ
1	Структура СУ 2	1,12387	3
2	Структура СУ 5	1,76141	4
3	Структура СУ 4	1,84054	3
4	Структура СУ 1	2,12423	2
5	Структура СУ 3	2,13175	3
6	Структура СУ 6	2,24784	5

Правила расчета ЧССУ позволяют однозначно определить максимальное число контуров регулирования для проектируемого ТП. Но этого недостаточно для проектирования эффективной структуры СУ. Исследование показывает, что наиболее эффективная структура СУ, обеспечивающая минимум ЧВВ, может быть спроектирована при минимальном ЧССУ. Для оценки минимального ЧССУ требуется определить избыточное число. Правила определения избыточного числа не имеют строгой формализации и во многом определяются уровнем понимания специалистами технологического процесса и общими рекомендациями. Также в исследовании показано, что структуры СУ с одинаковым ЧССУ и разными комбинациями парных переменных могут давать существенно отличающиеся результаты по ЧВВ.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование методики определения степеней свободы показало её недостаточность для решения задачи проектирования структуры СУ, обеспечивающей минимум показателя чувствительности к возмущающим воздействиям. Для решения данной задачи требуется

строгая формализация правил определения избыточного числа и парных переменных.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Барашкин Р.Л., Попадью В.Е., 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.
- [2] Барашкин Р.Л., Попадью В.Е., Калашников П.К., Южанин В.В., Абрамкин С.Е. Динамическое имитационное моделирование в решении задач проектирования систем управления объектов нефтегазовой отрасли // Международная научная конференция по проблемам управления в технических системах. 2019. Т. 1. С. 134-137.
- [3] Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. 4-е изд СПб.: Профессия, 2003. 752 с. ISBN 5-93913-035-6
- [4] Душин С.Е., Абрамкин С.Е. Математическое моделирование управляемых технологических процессов осушки природного газа // Информационно-управляющие системы, 2015, №4. С. 41-49. DOI:10.15217/issn1684-8853.2015.4.41
- [5] Хабибуллина А.Ф., Федосеев П.О., Барашкин Р.Л. Определение числа степеней свободы системы управления на примере блока первой ступени сепарации // Нефть и газ - 2020: Сборник трудов 74-й Международной молодежной научной конференции, Москва, 28 сентября – 04 2020 года. Москва: Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, 2020. С. 387-396.
- [6] Downs J.J., Skogestad S., 2011. An industrial and academic perspective on plantwide control. Annu. Rev. Control 35, 99–110. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2011.03.006>
- [7] Felder R.M. and Rousseau R.W., 2005. Elementary Principles of Chemical Processes, John Wiley & sons, Inc., NJ, USA.
- [8] Konda M., N. V. S. N., Rangaiah G.P., & Krishnaswamy P.R. A simple and effective procedure for control degrees of freedom. Chemical Engineering Science, 2006 <https://doi.org/10.1016/j.ces.2005.08.026>.
- [9] Konda M., N. V. S. N. M., & Rangaiah, G.P., 2007. Performance Assessment of Plantwide Control Systems of Industrial Processes. Industrial & Engineering Chemistry Research, 46(4), 1220–1231. doi:10.1021/ie0609261.
- [10] Linnhoff B., 1994. A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy Institution of Chemical Engineers.
- [11] Moore C.F., 1992. Selection of Controlled and Manipulated Variables. In Practical Distillation Control, [https://doi.org/10.1007/978-1-4757-0277-4\\_8](https://doi.org/10.1007/978-1-4757-0277-4_8).
- [12] Newell R.B., and P.L. Lee, 1988. Applied Process Control, Prentice-Hall of Australia, Brookvale, NSW
- [13] Peng Y., Zhu J., Dang L., Wei H., 2019. Plantwide control structure design of a complex hydrogenation process with four recycle streams. J. Taiwan Inst. Chem. Eng. 97, 24–46. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2019.01.032>.
- [14] Rangaiah G.P. and Kariwala V., 2012. Plantwide Control - Recent Developments and Applications, 21–42.
- [15] Seider, W.D., Seader, J.D., Lewin, D.R., 2004. Product and Process Design Principles: Synthesis Analysis and Evaluation. Wiley, New York.
- [16] Ward J.D., Mellichamp D.A., Doherty M.F., 2006. Insight from economically optimal steady-state operating policies for dynamic plantwide control. Ind. Eng. Chem. Res. 45. <https://doi.org/10.1021/ie050396t>.
- [17] Yang J., Hou Z., Dai Y., Ma K., Cui P., Wang Y., Zhu Z., & Gao J. (2021). Dynamic control analysis of interconnected pressure-swing distillation process with and without heat integration for separating azeotrope. Chinese Journal of Chemical Engineering, 29, 67–76. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2020.07.059>.
- [18] Zotică C., Nord L.O., Kovács J., Skogestad S., 2020. Optimal operation and control of heat to power cycles: A new perspective from a systematic plantwide control approach. Comput. Chem. Eng. 141, 106995. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.106995>