

# Динамическое имитационное моделирование в решении задач проектирования систем управления объектов нефтегазовой отрасли

Р. Л. Барашкин<sup>1</sup>, В. Е. Попадьюк<sup>2</sup>,  
П. К. Калашников<sup>3</sup>, В. В. Южанин<sup>4</sup>  
РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина  
<sup>1</sup> barashkin.r@gubkin.ru, <sup>2</sup> pve@gubkin.ru,  
<sup>3</sup> kalashnikov\_pk@bk.ru, <sup>4</sup> yuzhanin.v@gubkin.ru

С. Е. Абрамкин  
Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
abrsergey@yandex.ru

**Аннотация.** С развитием программного обеспечения для динамического имитационного моделирования и ростом вычислительных мощностей компьютерной техники динамические модели стали широко использоваться для исследования поведения динамических объектов управления технологических процессов, проектирования систем управления и тестирования систем противоаварийной защиты. При проектировании систем управления современных предприятий важно на начальном этапе идентифицировать возможные возмущающие воздействия, исследовать их влияние на технологический процесс и предусмотреть программно-технические средства компенсации данных возмущений. Идентификация возможных возмущающих воздействий на ранней стадии проектирования предприятий нефтегазовой отрасли позволяет эффективно подобрать средства измерения технологических параметров для мониторинга объекта управления, синтезировать систему управления для поддержания номинального режима, а также компенсировать возмущающие воздействия до момента их существенного воздействия на объект управления. В рамках исследования разрабатываются динамические имитационные модели технологических процессов с целью выбора структуры, настройки и тестирования систем управления по заданию и возмущению, а также моделирования нештатных ситуаций.

**Ключевые слова:** динамическое моделирование; имитационное моделирование; проектирование систем управления; настройка систем управления; системы управления объектов нефтегазовой отрасли; автоматизация технологических процессов

Для решения задач проектирования систем управления (СУ) технологических процессов (ТП) разработаны различные методы [7], в том числе, использующие динамическое моделирование [4]. В работе приводится анализ задач проектирования СУ и подходов их решения с помощью динамического моделирования.

## I. НАЗНАЧЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Динамическое моделирование с 60-х годов прошлого столетия используется в нефтегазовой отрасли для

решения научно-исследовательских и оптимизационных задач, различных стадий проектирования ТП, обучения персонала [8]. Наиболее широко распространенные пакеты имитационного моделирования: Aspen Plus, Aspen Hysys (AspenTech), ChemCAD (Chemstations), UniSim Design (Honeywell) [2] позволяют исследовать динамику изменения технологических параметров, анализировать смену режимов работы ТП, синтезировать СУ, отрабатывать редко повторяющиеся события, тестировать алгоритмы систем противоаварийной защиты (ПАЗ). С развитием программных средств имитационного моделирования сформировались подходы к разработке и модернизации динамических моделей ТП [10].

## II. ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ ДИНАМИЧЕСКИХ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

Классический жизненный цикл разработки и модернизации динамических имитационных моделей ТП предприятий нефтегазовой отрасли [11] приведён на рисунке.1.

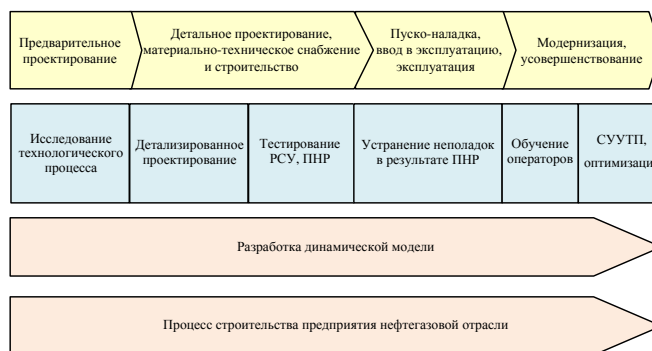


Рис. 1. Жизненный цикл динамических имитационных моделей

Разработка динамической модели осуществляется на всем протяжении процесса строительства нефтегазового предприятия, и в рамках проектных этапов решаются следующие задачи [1]:

*А. Предварительное проектирование.  
Разработка упрощенной динамической модели  
на основе данных статического  
моделирования*

- изучение особенностей ТП, формулирование цели и задач разработки имитационной модели;
- подготовка технического задания на разработку имитационной модели;
- разработка статической модели, расчет характеристик оборудования, определение номинальных режимов работы ТП;
- несмотря на то, что пакеты имитационного моделирования позволяют переводить готовую статическую модель в динамическую, рекомендуется разработку динамических моделей с большим числом объектов начинать заново в динамическом режиме;
- первичное конфигурирование технологического оборудования динамической модели, уточнение спецификаций на основе данных из статической модели, параметризация граничных условий;
- проектирование архитектуры СУ, добавление в динамическую модель средств автоматизации и алгоритмов противоаварийной защиты, анализ показателей качества СУ;
- исследование режимов работы технологического оборудования и процесса в целом;
- на основе результатов исследований осуществляется корректировка технического проекта.

*В. Детальное проектирование*

- по мере разработки технической документации проекта в динамической модели уточняются характеристики оборудования;
- проводится исследование СУ по каналам задания и возмущения. Осуществляется поиск способов эффективной компенсации возмущений с применением компенсаторов и систем расширенного управления;
- разрабатываются алгоритмы управления и автоматические последовательности, определяются предварительные параметры настройки регуляторов (окончательные определяются на этапе пуско-наладки объекта);
- проверяются алгоритмы систем противоаварийной защиты;
- проводятся исследования поведения ТП на различных режимах работы [5];
- тестируются алгоритмы распределенных систем управления (РСУ), интерфейсы связи, операторские интерфейсы (имитационная модель

через промышленные интерфейсы связи подключается к РСУ).

*С. Пуско-наладка, ввод в эксплуатацию,  
эксплуатация*

- пуско-наладочные работы включают поэтапное тестирование оборудования, линий и установок и последовательный ввод в работу;
- идентификация параметров модели по реальным данным;
- динамические модели позволяют на данном этапе прорабатывать различные сценарии перед проведением физических работ на объекте.

*Д. Модернизация, усовершенствование ТП*

- во время эксплуатации ТП динамические модели используются для предварительного исследования результатов планируемой модернизации производства;
- по мере модернизации ТП одновременно вносятся изменения в динамические модели;
- естественным развитием жизненного цикла динамических моделей является их использование в компьютерных тренажерных (КТ) для подготовки нового персонала, повышения квалификации и отработки навыков по ведению ТП штатного персонала;
- модели используются в системах усовершенствованного управления;
- решаются задачи оптимизации технологического процесса, осуществляется поиск решений для повышения энергоэффективности циклов [6], [9], [10].

**III. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ  
ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ**

От исходных данных существенно зависит адекватность динамической модели. Типовой набор исходных данных для разработки динамических моделей:

- технологический регламент, технологическая схема с пояснительной запиской, режимные листы, технологические инструкции производственных операций;
- проект схемы трубной обвязки и КИПиА, трассировка труб;
- паспорта на технологическое оборудование (запорно-регулирующая арматура, машины, аппараты, сопряженное оборудование и др.);
- список сигнальных приборов и устройств отключения;
- план ликвидации аварийных ситуаций, матрица причинно-следственных связей системы ПАЗ;

- материально-тепловой баланс, характеристики технологических сред, сырья и продукции.

На основании приведённых исходных данных инициируется разработка динамической имитационной модели.

#### IV. ЭТАПЫ РАЗРАБОТКИ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

##### *A. Разработка шаблона именования объектов имитационной модели*

Для сокращения времени разработки модели рекомендуется разработать и использовать на начальном этапе шаблон именования объектов модели с учетом технологического регламента ТП и требований организации взаимодействия модели с внешними источниками/потребителями данных.

##### *B. Разработка имитационной модели в команде*

При организации командной работы над созданием имитационной модели рекомендуется выделить технологические блоки и определить точки их сопряжения. Пакеты имитационного моделирования поддерживают шаблонизацию и импорт/экспорт объектов между файлами с имитационными моделями. Рекомендуется вести детальный лог вносимых изменений в модели, что в дальнейшем облегчает поиск решений.

##### *C. Разработка основной технологической цепочки процесса*

Анализ ТП на предмет выбора уравнения состояния, моделирования объектов с использованием готовой библиотеки объектов и необходимости создание интегрированных моделей нетипового оборудования. Рекомендуется сначала разработать модель, включающую типовые объекты библиотеки и упрощенные модели нетипового оборудования. На данном этапе выявляются наиболее сложные для моделирования части ТП и определяются направления дальнейших исследований и разработок.

Рекомендуется разработать правила именования файлов моделей и структуру папок для хранения. Дата, версия, шаг интегрирования, краткая отметка о решенной задаче позволяет сделать более удобным процесс разработки модели. Также рекомендуется использовать системы контроля версий и хранения внутренних состояний модели.

##### *D. Разработка математических моделей нетипового оборудования*

Пакеты имитационного моделирования включают в свой состав программные средства для разработки дополнительных математических моделей оборудования и использования их в общей технологической цепочке. Разработка таких моделей более эффективна, когда имеется остальная часть модели ТП с использованием типового оборудования, на которой можно отлаживать и тестировать разрабатываемые алгоритмы.

При разработке модели рекомендуется поблочно добавлять объекты, запускать численный решатель и анализировать состояние модели. Это занимает на начальном этапе больше времени, но позволяет своевременно выявить ошибку моделирования и в долгосрочном плане сократить время создания динамической модели. В случае ошибочной конфигурации объекта, запуска интегратора и появления ошибки решателя, рекомендуется заново открыть файл модели и правильно сконфигурировать объект.

Для верификации состояния модели необходимо выбрать технологические параметры, которые характеризуют состояние процесса, например, рабочие точки компрессоров, давления, температуры, расходы, парожидкостное состояние в ключевых точках технологии. Сравниваются полученные значения в результате динамического моделирования со значением статической модели. Необходимо также следить за физичностью и динамикой изменения данных параметров.

##### *E. Уточнение параметров объектов модели*

На первой итерации разработки модели крайне сложно учесть все нюансы ТП и выбрать правильные способы их моделирования. Поэтому после разработки основной технологической цепочки с типовым и нетиповым оборудованием выявляются детали, которые не были учтены в данной модели, либо специально были опущены для ускорения разработки первой версии.

На данном этапе уточняются геометрические, технические характеристики оборудования, высотные отметки, добавляются фиктивные объекты для уточнения особенностей работы ТП или обеспечения более стабильной работы модели и др.

##### *F. Исследование стабильности модели при переходных процессах*

Ещё одной важной целью быстрой разработки первой версии модели является анализ её стабильности на номинальных режимах и при переходных процессах. Увеличение числа моделируемых объектов, наличие рециклов усложняют поиск численного решения системы уравнений и снижается скорость расчета. При разработке динамической модели важно обеспечивать баланс между точностью расчета и его скоростью. В зависимости от сложности решаемой задачи скорость расчета может стать слишком малой. С другой стороны, в случае сложного моделируемого ТП, приходится уменьшать шаг численного решения системы уравнений для обеспечения сходимости решения при переходных процессах. Поэтому наличие первой версии динамической модели позволяет оценить скорость расчета и стабильность модели при переходных процессах, пуске и останове оборудования. В случае неустойчивости модели приходится уменьшать шаг моделирования, что снижает скорость, либо искать способы упрощения модели.

Сходимость численных методов гидравлического расчета технологических сетей может ухудшаться при моделировании технологических режимов, в которых

имеются потоки с нулевыми или малыми расходами. В таких случаях возможно кратковременно уменьшение шага интегрирования до тех пор, пока не появятся ненулевые расходы, и численные алгоритмы смогут найти решение.

Также на стабильность модели влияет выбор термодинамического пакета. В определённых случаях выбор другого термодинамического пакета обеспечивает лучшую стабильность модели при переходных процессах.

## V. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

### A. Разработка базовой системы управления

После разработки базовой динамической имитационной модели ТП синтезируется СУ:

- определяются регулируемые и регулирующие параметры;
- анализируются возмущающие воздействия;
- определяется структура системы управления;
- определяются параметры настройки регуляторов.

С помощью анализа степеней свободы [3] оценивается количество регуляторов и формируется предварительная структура СУ. В случае наличия альтернативных структур рекомендуется выбирать структуру с меньшим числом регуляторов.

В имитационную модель добавляются регуляторы в соответствии с разработанной структурой, и анализируется поведение модели на номинальных режимах, при смене режимов работы и подаче возмущающих воздействий. Как правило, предложенная структура СУ в дальнейшем изменяется эмпирическим методом для обеспечения заданного качества регулирования.

### B. Определение параметров настройки регуляторов

Для определения параметров настройки регуляторов используются встроенные алгоритмы автоматической настройки и методы, зарекомендовавшие себя в нефтегазовой отрасли.

При настройке параметров регуляторов рекомендуется параметризовать инерционность технологического оборудования для адекватной настройки регуляторов.

### C. Отладка последовательностей технологических операций

Последовательности технологических операций включают действия по различным условиям. Выполнение таких последовательностей в ручном режиме достаточно трудоёмкая задача, к тому же сложно воспроизводимая. Поэтому для отладки последовательностей операций рекомендуется использовать встроенные средства автоматизации действий.

Не рекомендуется осуществлять резкие изменения параметров, например, перекрытие потока за один шаг моделирования, это приводит к резким скачкам технологических параметров и неустойчивости модели.

### D. Тестирование алгоритмов системы противоаварийной защиты

В пакетах имитационного моделирования рекомендуется использовать встроенное средство для настройки матрицы причинно-следственных связей и тестирования работы алгоритмов на базе разработанной модели.

## VI. ВЫВОДЫ

Результаты проведённого исследования показывают, что использование динамических моделей при проектировании СУ ТП позволяет детально отрабатывать технологические операции, своевременно выявлять ошибки в выборе структуры СУ, оценивать показатели качества регулирования, исследовать алгоритмы системы ПАЗ, подготавливать операторов. В докладе приводятся примеры применения динамического моделирования для проектирования СУ фрагментов ТП нефтегазовой отрасли.

## VII. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Austbø B., Løvseth S.W., Gundersen T., Annotated bibliography – use of optimization in LNG process design and operation, Comput. Chem. Eng. 71, 2014, pp 391–414.
- [2] Balaton M.G., Nagy L., Szeifert F., Operator training simulator process model implementation of a batch processing unit in a packaged simulation software, Computers & Chemical Engineering, Volume 48, 2013, Pages 335–344, ISSN 0098-1354, <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2012.09.005>.
- [3] Konda N.V.S.N.M., Rangaiah G.P. and Krishnaswamy P.R. (2006) A simple and effective procedure for control degrees of freedom. Chemical Engineering Science, 61, 1184–1194.
- [4] Luyben W.L. Plantwide Dynamic Simulators in Chemical Processing and Control, CRC Press, New York, 2002, p.429
- [5] Mansy M.M., McMillan G.K., Sowell M.S., 2002. Step Into the Virtual Plant. Chemical Engineering Progress 98 (2), 56–61.
- [6] Masuda K., Nakamura M., Momose T., Oct. 8–11, 2012. The Use of Advanced Dynamic Simulation Technology in the Engineering of Natural Gas Liquefaction Plants, paper presented at the Gastech 2012 Conference & Exhibition, London, UK.
- [7] Rangaiah G.P., Kariwala V., Plantwide Control: Recent Developments and Applications, First Edition. John Wiley & Sons 2012, p.498
- [8] Sundquist S., Ilme J., Määttä L., & Turunen I. (2000). Using models in different stages of process life-cycle. Computers & Chemical Engineering, 24(2–7), 1253–1259.
- [9] Patel V., Feng J., Dasgupta S., Ramdoss P., Wu J., Sept. 10–13, 2007. Application of Dynamic Simulation in the Design, Operation, and Troubleshooting of Compressor Systems, paper presented at the 36th Turbomachinery Symposium, Houston, TX, USA.
- [10] Valappil J., Mehrotra V., Messersmith D., Oct. 2005. LNG Lifecycle Simulation. Hydrocarbon Engineering 10 (10), 27–34.
- [11] Wedel L.V., Bayer B., Marquardt W., July 18–23, 1999. Perspectives on Lifecycle Process Modeling, paper presented at the 5th International Conference on Computer Aided Process Design, Breckenridge, CO, USA.