

Моделирование управления давлением в трубопроводе в среде Engage

А. К. Петрова

Кафедра Инноватики и технологического предпринимательства

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

ak72p@yandex.ru

С. Е. Абрамкин

Кафедра автоматики и процессов управления

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

seabramkin@etu.ru

Аннотация. Актуальность задачи автоматического управления давлением в трубопроводах обусловлена необходимостью повышения надёжности и эффективности промышленных систем. В работе представлен подход к моделированию такой системы с использованием среды разработки Engage, которая обеспечивает гибкие инструменты для физического моделирования и визуализации процессов.

Ключевые слова: моделирование, давление, трубопровод, PID-регулятор, управление, симуляция, Engage

I. ВВЕДЕНИЕ

Эффективное моделирование и автоматизация регулирования давления в трубопроводах - одна из ключевых задач современной энергетики и газотранспортной инфраструктуры.

По мнению экспертов газотранспортных предприятий [1–3], необходимо разработать, с учетом геометрии труб и условий окружающей среды, систему прогнозирования, предупреждения и визуализации информации для решения таких задач, как:

- Прогнозирование вероятности превышения рабочих значений.
- Прогнозирование динамики давления и предупреждение о времени достижения критического значения, в случае превышения рабочих значений.
- Прогнозирование объёма запаса в системе, для принятия решения о необходимости реагирования в следующих случаях:
 - при аварийном останове или отключении;
 - при резком увеличении нагрузки;
 - при температурных изменениях окружающей среды;
 - для ежегодных профилактических работ и планово-предупредительного ремонта.

Среда Engage [4] позволяет проектировать физико-математические модели, интегрировать ПИД- и ПИ-регуляторы, переходить к генерации управляющего кода для встраиваемых платформ, а также исследовать сценарии устойчивости и небаланса в сложных системах [1–2].

II. АРХИТЕКТУРА МОДЕЛЕЙ РЕГУЛИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ

Моделирование задачи управления давлением в трубопроводе в среде Engage строится на создании единой замкнутой системы, включающей источник давления, регулирующий клапан, датчик давления, а также блоки моделирования утечек и конечного резервуара. Такая конфигурация позволяет получить реалистичные сценарии эксплуатации, учитывающие технологические потери и возмущения.

A. Типовой прототип для жидкостных и газовых магистралей

Типовая задача управления давлением сводится к необходимости поддерживать определённое значение давления в конкретной точке трубопровода за счет воздействия регулирующего органа (клапана) в условиях наличия внешних и внутренних возмущений (утечек, скачков расхода, смены задания и т.д.).

- Источник: начальное/опорное давление.
- Управляемый клапан, дроссель или ЛОРД: регулирующий элемент, изменяющий расход или диаметрального сечения.
- Объем: сегмент трубы с моделированием накопления энергии среды.
- Датчики: точка обратной связи, измеряющая давление для передачи в регулятор.
- PID-или PI-регулятор: вычисляет управляющее действие по ошибке между заданием и фактическим значением.
- Утечка, сброс: элементы, позволяющие смоделировать реальные возмущения или аварийные ситуации.
- Блоки автоматизации: интерфейсы с физическими контроллерами (ADC, PWM, Serial для Arduino), что даёт возможность переносить алгоритм из симуляции в аппаратную среду.

Выходная величина контролируется по отклонению $e(t)$, где $e(t) = P_{\text{задан}} - P_{\text{факт}}$.

Контур замыкается через ПИД- или ПИ-регулятор, который перерабатывает сигнал ошибки и формирует управляющее воздействие на клапан.

III. ПРИНЦИПЫ НАСТРОЙКИ И ИНТЕГРАЦИИ РЕГУЛЯТОРА

A. Алгоритм ПИ-регулятора

В системе управления используется пропорционально-интегральный регулятор:

Пропорциональное звено (K_p): усиливает реакцию на текущее отклонение. Более высокий коэффициент ускоряет подход к уставке, но увеличивает риск перерегулирования.

Интегральное звено (K_i): устраняет остаточную ошибку по мере накопления небольших отклонений; инерционность может вызвать осцилляции.

Реализованы следующие принципы защиты:

- Границы насыщения управляющего сигнала (верхняя и нижняя) – предотвращают выход за реалистичные физические пределы.
- Антизаклочительный метод back-calculation: контролирует величину интегрального слагаемого, предотвращая его разгон в случае насыщения регулятора.

Пример управляющего алгоритма:

i text

integral += error * dt

u = $K_p * \text{error} + K_i * \text{integral}$

u = clamp(u, Umin, Umax)

if u == Umin or u == Umax:

 integral += (u_actual - u) * backCalcGain * dt

где K_p – коэффициент усиления пропорционального звена; K_i – коэффициент интегрального звена; Umin/Umax – пределы физической реализуемости управляющего сигнала (степень открытия клапана, 0...100%); dt – шаг дискретизации; backCalcGain – коэффициент антизатухающей коррекции для предупреждения проблемы «интегрального насыщения».

Вычисление оптимальных коэффициентов K_p и K_i производится по данным моделирования или с помощью

Источник:	Давление 0,15 МПа
Клапан 1:	Максимальное сечение 0.005 м2
Трубопровод:	Длина 225.0 м
Трубопровод:	Гидравлический диаметр 0.1128 м
Утечка:	Максимальное сечение 0.01 м2
Объём	2,25 м3
Сброс	0,05 МПа

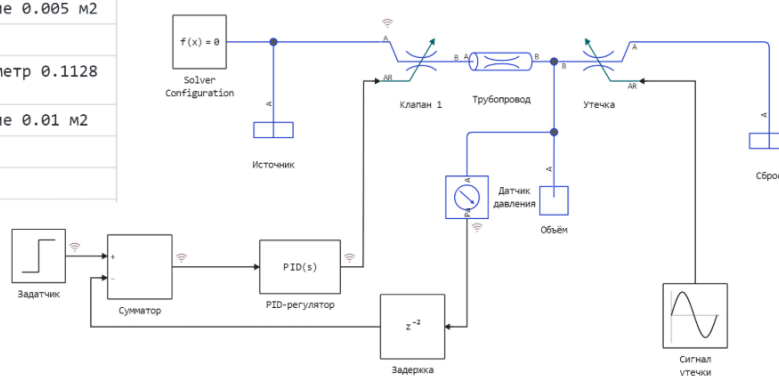


Рис. 1. Модель трубопровода с системой управления

B. Принцип работы модели

Трубопровод описывается блоками библиотеки физического моделирования, в частности, за его объём отвечает блок Объём.

Через Клапан 1 жидкость поступает из блока Источник в блок Объём. К нему, в свою очередь,

стандартных методик, исходя из требований назначения системы:

- Быстродействие – насколько быстро система выходит на уставку;
- Минимизация перерегулирования – подавление осцилляций;
- Запас устойчивости – отсутствие «разгона» регулятора в аварийных режимах и при насыщениях.

Ограничения и фильтрация входных/выходных сигналов обеспечиваются встроенными функциями среды Engge (блоки Saturation, Rate Limiter и др.).

B. Моделирование и анализ переходных процессов

Модель позволяет выполнять численное моделирование переходных процессов: при включении подачи давление в трубопроводе стабилизируется примерно за 10–20 секунд. Возмущения (например, утечки или скачки задания) транслируются на вход регулятора, а управляющее воздействие корректирует степень открытия клапана в соответствии с алгоритмом.

Данные могут экспортироваться в CSV-формат, строятся графики отклика давления и управляющего сигнала.

IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ В СРЕДЕ ENGEE

A. Основные сценарии моделирования

Модель участка трубопровода представлена на рис. 1 [5].

После построения модели пользователь может выполнить расчет переходных процессов, отмечая:

- Время установления давления после подачи опорного значения.
- Устойчивость значения давления при наличии возмущений (например, скачкообразного увеличения утечки).
- Качество регулирования при пошаговой или плавной смене задания.

присоединён Датчик давления, с которого сигнал поступает на систему управления, представленную сумматором, задатчиком и PID-регулятором.

PID-регулятор посылает управляющий сигнал на Клапан 1, чтобы тот открылся или закрылся, обеспечивая регулирование давления.

Справа от блока Объём, по пути движения жидкости, находится блок Утечка, который представляет собой, как и Клапан 1 управляемый дроссель.

Блок Утечка создаёт некоторое "случайное" истечение жидкости из моделируемого трубопровода.

Жидкость, проходящая через этот блок, по итогу поступает в Сброс, который описывается бесконечным резервуаром с заданным давлением.

Граничные условия

1. В источнике давление 151,3 кПа.
2. В резервуаре, характеризующем пространство, куда осуществляется сброс жидкости через утечку, давление всегда равно 50 кПа.

Начальные условия:

1. Начальное давление в трубопроводе 100 кПа.
2. Сигнал задатчика равен 100 кПа.

Пример переходной характеристики представлен на рис. 2 [5].

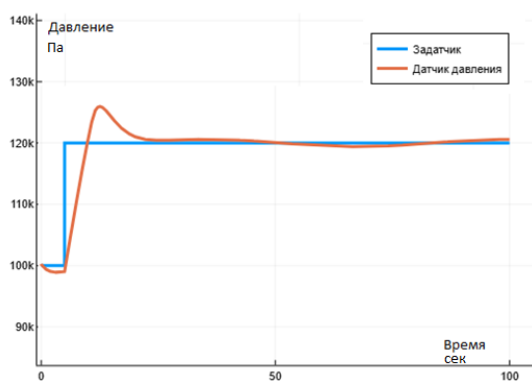


Рис. 2. Визуализация результатов моделирования

В начале процесса при включении подачи управляющий сигнал приводит к открытию клапана, давление возрастает до уставки и стабилизируется на требуемом уровне за 10–20 секунд. При возникновении утечки значение теряет устойчивость, но корректное поведение ПИ-контроллера позволяет избежать недопустимых провалов.

Вся информация о переходных процессах экспортируется в виде графиков и CSV-файлов.

С. Особенности и расширяемость моделей

Возможно создать не только базовую схему, но и добавить дополнительные модули, например

- Имитация аварийного снижения давления (резкий рост утечки, отключение источника).
- Учет сезонных изменений температуры внешней среды и влияния на параметры жидкости;

- Моделирование различных видов исполнительных устройств - гидравлических, электромеханических и пневматических клапанов с индивидуальными характеристиками.

Дополнительно, использование ГОСТ Р 27.303-2021 [6] позволяет еще на этапе проектирования учесть критические сценарии и повысить общую надежность системы.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексное использование среды Engee для моделирования, анализа и последующей реализации систем управления давлением в трубопроводе даёт инженерам уникальную возможность пройти полный цикл работ:

- Построить адекватный цифровой двойник.
- Подобрать и отточить алгоритмы управления без риска нарушить работу реального оборудования.
- Провести цифровое тестирование аварийных и нештатных режимов.
- Автоматизировано перенести алгоритм управления на аппаратную платформу.

Возможности среды адаптируются под требования современного промышленного предприятия, открывая перспективы для дальнейшей цифровизации и повышения надежности технологических объектов. Это позволяет значительно ускорить цикл проектирования и внедрения инновационных систем управления в промышленности, повысить надёжность и безопасность транспортных систем.

Статья подготовлена на основе материалов Engee Helpcenter [3–4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Альтшуль С.Д., Имаев Д.Х., Квашнин С.В., Шестопалов М.Ю. Распределенное управление процессами компримирования природного газа, СПб, изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 184 с
- [2] Душин С.Е., Зотов Н.С., Имаев Д.Х. Теория автоматического управления, под ред. В.Б. Яковлева. М. Высшая школа, 2003.-567 с.: ил.
- [3] Абрамкин С.Е., Петрова А.К. Моделирование участка газотранспортной системы в среде Simulink // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024, Т. 17, № 2. С. 92-96.
- [4] Среда моделирования Engee [Электронный ресурс] Режим доступа: // <https://start.engee.com> (дата обращения 15.07.2025)
- [5] Engee Helpcenter [Электронный ресурс] Режим доступа: // https://engee.com/helpcenter/stable/ru/interactive-scripts/physmod/liquid_pressure_regulator.html (дата обращения 15.07.2025)
- [6] ГОСТ Р 27.303-2021 Надежность в технике. Анализ видов и последствий. Москва. Российский институт стандартизации. 2021.