

# Проектирование системы диагностики регулирования давления в нефтепроводе в условиях Арктической зоны

Д. А. Баженова

Санкт-Петербургский горный университет  
императрицы Екатерины II

bazhenovadara9@gmail.com

А. П. Истягина

Санкт-Петербургский горный университет  
императрицы Екатерины II

istagina\_a@mail.ru

**Аннотация.** В статье проектируется программа системы диагностики автоматического регулирования давления нефтепровода в условиях Арктической зоны. Предложена математическая модель на основе аperiodического звена первого порядка с запаздыванием, реализованная на языке Python, позволяющая идентифицировать характерные неисправности по диагностическим параметрам переходного процесса.

**Ключевые слова:** Арктическая зона; нефтепровод; автоматическое регулирование давления; математическое моделирование

## I. ВВЕДЕНИЕ

Освоение Арктики является одним из приоритетных направлений развития топливно-энергетического комплекса Российской Федерации. Эксплуатация нефтепроводов в условиях Арктической зоны сопряжена с комплексом специфических факторов: экстремально низкие температуры (до  $-50^{\circ}\text{C}$  и ниже), значительные перепады температур, повышенная вязкость нефти, сложность логистики обслуживания, высокие требования к надежности оборудования [1].

Система автоматического регулирования давления (САРД) является критическим элементом обеспечения безопасной транспортировки углеводородов. Ее отказ может привести к гидроударам, разгерметизации трубопровода и экологическим катастрофам, последствия которых в арктических условиях усугубляются низкой способностью экосистем к самовосстановлению. Проблема диагностики малых отклонений параметров в условиях низких температур приобретает особую значимость [2].

Особенностью арктических условий является изменение динамических характеристик регулирующей арматуры и датчиков давления при низких температурах: увеличивается время реакции, появляются дополнительные запаздывания, изменяются коэффициенты усиления. Эффективность поиска неисправностей существенно зависит от выбора математической модели [3]. Это требует разработки специализированных диагностических систем, способных учитывать климатические факторы.

## II. ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ САРД В АРКТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Эксплуатация нефтепроводов в Арктике связана с особенностями окружающей среды. К основным факторам, влияющим на работу САРД, относят температурное воздействие («Согласно данным,

полученным при эксплуатации арктических трубопроводных систем, диапазон рабочих температур может достигать  $70^{\circ}\text{C}$  (от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+30^{\circ}\text{C}$ ), что требует специальных конструктивных решений для обеспечения работоспособности оборудования» [4]), изменение свойств перекачиваемой среды (вязкость нефти при понижении температуры возрастает в несколько раз, что увеличивает гидравлическое сопротивление и инерционность системы), удаленность объектов (отсутствие постоянного оперативного персонала на многих участках требует развития автоматических средств диагностики с возможностью удаленного мониторинга), надежность (вероятность отказов оборудования в арктических условиях выше, диагностическая система должна обеспечивать раннее обнаружение неисправностей).

Учет этих факторов при проектировании математической модели и алгоритмов диагностики является необходимым условием обеспечения достоверности результатов [3].

## III. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ

В качестве базовой математической модели выбрано аperiodическое звено первого порядка с запаздыванием. Выбор данной модели обоснован тем, что большинство технологических процессов транспортировки нефти могут быть с достаточной точностью аппроксимированы подобными динамическими звеньями [5].

Расчет переходного процесса выполняется по формуле:

$$P(t) = K \cdot (1 - e^{-(t-\tau)/T}) + off \quad (1),$$

где:  $K$  – коэффициент усиления;  $T$  – постоянная времени;  $\tau$  – время запаздывания;  $off$  – смещение (статическая ошибка)

Для моделирования различных режимов работы системы (нормальная работа, засорение клапана, износ регулятора) в работе используется словарь коэффициентов, каждому режиму соответствуют множители для параметров, статическая ошибка и текстовое сообщение.

Для имитации реальных измерений в модель добавлен шум, что позволяет приблизить результаты моделирования к реальным данным, получаемым с датчиков давления в условиях эксплуатации.

#### IV. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

В программной реализации модель представлена классом *PressureModel*, конструктор которого инициализирует основные параметры:

```
class PressureModel:
    def __init__(self, K=1.5, T=5.0, tau=1.0, noise=0.05):
        self.K, self.T, self.tau, self.noise = K, T, tau, noise
```

Рис. 1. Класс PressureModel

Расчет переходного процесса выполняется методом *calc*. Для моделирования различных режимов работы (нормальная работа, засорение клапана, износ регулятора) используется словарь коэффициентов.

```
17     modes = {
18         "clogged": (0.8, 2.0, 2.5, 0.15, "▲ ЗАСОРЕНИЕ"),
19         "worn": (1.6, 0.5, 0.7, 0.05, "▲ ИЗНОС"),
20         "normal": (1.0, 1.0, 1.0, 0, "✅ НОРМА")
21     }
22     kf, tf, tau_f, off, msg = modes[mode]
```

Рис. 2. Метод calc

Каждому режиму соответствуют множители для параметров модели, статическая ошибка и текстовое сообщение. Для режима «Засорение» коэффициент усиления умножается на 0,8, постоянная времени увеличивается в 2 раза, время запаздывания возрастает в 2,5 раза. Для режима «Износ» коэффициент усиления увеличивается на 1,6, постоянная времени на 0,5, время запаздывания сокращается на 0,7.

Выбор коэффициентов для моделирования неисправностей основан на результатах исследования [6], где показано, что при засорении клапана постоянная времени увеличивается в 1,8–2,5 раза, а время запаздывания возрастает в 2–3 раза. механический износ регулирующего органа приводит к увеличению коэффициента усиления на 40–80% и снижению постоянной времени на 40–60% [7].

Расчет переходного процесса выполняется по формуле аперидического звена первого порядка с запаздыванием:

```
for i, time in enumerate(t):
    y[i] = off if time < tau_eff else K_eff*(1-np.exp(-(time-tau_eff)/T_eff)) + off
```

Рис. 3. Расчет переходного процесса

Если время меньше времени запаздывания, давление равно значению смещения (статической ошибке). В противном случае используется формула (1).

Для имитации реальных измерений в модель добавляется гауссов шум:

```
28     y += np.random.normal(0, self.noise, len(t))
```

Рис. 4. Добавление шума

#### V. АЛГОРИТМ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ

Диагностирование состояния САРД осуществляется на основе анализа переходной характеристики.

Установившееся значение давления вычисляется как среднее последних 200 точек переходного процесса:

```
29     y_final = np.mean(y[-200:])
```

Рис. 5. Расчет установившегося значения

Время регулирования определяется как момент входа переходного процесса в 5%-ную зону от установившегося значения. Параметр находится итерационным перебором с конца временного массива:

```
31     ts = t[-1]
32     for i in range(len(y)-1, -1, -1):
33         if abs(y[i]-y_final) > 0.05*y_final:
34             ts = t[min(i+1, len(t)-1)]; break
```

Рис. 6. Определение времени регулирования

Перерегулирование вычисляется как максимальное относительное превышение давления относительно установившегося значения и выражается в процентах:

```
36     ov = max(0, (np.max(y[200:])-y_final)/y_final*100)
37     return t, y, K_eff, msg, ts, ov
```

Рис. 7. Расчет перерегулирования

#### VI. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТИПА НЕИСПРАВНОСТИ

Идентификация осуществляется на основе сравнения полученных диагностических параметров с эталонными значениями. В работе рассматриваются три состояния: нормальная работа, засорение клапана, износ регулятора. Логика классификации реализована следующим образом:

- При наличии статической ошибки ( $off > 0.1$ ) и увеличении времени регулирования диагностируется засорение клапана;
- При превышении перерегулированием порогового значения ( $overshoot > 10\%$ ) диагностируется износ регулятора.

В остальных случаях фиксируется нормальная работа.

Предложенный алгоритм базируется на методологии диагностирования динамических систем, изложенной в работе [3], где показано, что использование диагностических признаков, основанных на анализе отклонений выходных сигналов от номинальных значений, позволяет надежно идентифицировать параметрические дефекты.

#### VII. Программная реализация вычислительного ядра

Программная реализация диагностической системы выполнена на языке Python. Выбор языка обусловлен наличием развитых библиотек для численных расчетов (*NumPy*) и возможностью последующей интеграции в промышленные системы мониторинга.

Основным вычислительным модулем является класс *PressureModel*, реализующий математическую модель и алгоритмы диагностики, описанные в предыдущих разделах.

Для организации ввода параметров и управления расчетом реализованы переменные, которые хранят значения параметров модели и режим диагностики:

```
45     self.k = tk.DoubleVar(value=1.5)
46     self.t = tk.DoubleVar(value=5.0)
47     self.tau = tk.DoubleVar(value=1.0)
48     self.noise = tk.DoubleVar(value=0.05)
49     self.mode = tk.StringVar(value="normal")
```

Рис. 8. Инициализация параметров модели и элементов управления графического интерфейса

Метод *calc* вызывается при инициировании расчета и реализует основную логику работы программы. После получения значений из полей ввода и проверки их корректности создается экземпляр модели и выполняется расчет:

```
def calc(self):
    try:
        K, T, tau, noise = self.k.get(), self.t.get(), self.tau.get(), self.noise.get()
        if K<=0 or T<=0 or tau<0:
            messagebox.showerror("Ошибка", "Параметры должны быть >0")
        return
```

Рис. 9. Алгоритм получения входных данных и создания экземпляра модели

Результаты расчета (временной ряд давления, диагностические параметры) возвращаются для дальнейшего анализа.

Разработанное вычислительное ядро характеризуется линейной зависимостью времени выполнения и объема используемой памяти от количества точек временной шкалы. В работе использовано 1000 точек для обеспечения высокой скорости вычислений.

### VIII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе спроектирована система диагностики регулирования давления нефтепровода в условиях Арктической зоны. На основе анализа предметной области выявлены основные факторы, влияющие на работу системы автоматического регулирования давления при низких температурах, включая изменение инерционности регулирующей арматуры, увеличение времени запаздывания и рост погрешности измерений. Разработана математическая модель на основе аperiodического звена первого порядка с запаздыванием, дополненная гауссовым шумом для имитации реальных измерений. Модель позволяет имитировать три состояния системы: нормальную работу, засорение клапана и износ регулятора. Реализован алгоритм расчета диагностических параметров: установившегося значения, времени

регулирования и перерегулирования, на основе которых разработана логика идентификации типов неисправностей. Выполнена программная реализация вычислительного ядра на языке Python. Программный модуль характеризуется линейной вычислительной сложностью и может быть интегрирован в различные системы верхнего уровня, такие как SCADA-системы, промышленные контроллеры или облачные платформы мониторинга. Разработанное программное обеспечение может использоваться в качестве основы для создания промышленных систем технической диагностики САРД на объектах нефтепроводного транспорта в Арктической зоне.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Громаков Е.И., Кравчук Д.Е., Лиепиньш А.В. Многоконтурное регулирование давления в магистральном нефтепроводе // Международный научно-исследовательский журнал. 2014. № 5–1 (24). С. 79–81.
- [2] Bryce P.W. Leak-detection system designed to catch slow leaks in offshore Alaska line // Oil & Gas Journal. 2002. Vol. 100, No. 50. P. 53–59.
- [3] Пат. РФ № 2450309 / В.Ф. Кудинов, И.В. Кудинов, А.Ю. Келина. Способ поиска неисправностей динамического блока в непрерывной системе; № 2010148269/08. Опубл. 10.05.12. Бюл. № 13.
- [4] Коростелёв Д.А., Левая М.Н., Левый И.С. Автоматизация процесса мониторинга и регулирования давления в нефтепроводе // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2017. № 1. С. 37–47.
- [5] Зотов Б.Н. К вопросам прогнозирования энергопотребления при транспортировке нефти и энергосбережения на нефтепроводах // Территория Нефтегаз. 2016. № 10. С. 94–100.
- [6] Araujo A.P., Munaro C.J., Rosado Filho M. Quantification of Valve Stiction and Dead Band in Control Loops Based on the Harmonic Balance Method // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2012. Vol. 51, No. 43. P. 14121–14134.
- [7] Munaro C.J., Cuadros M.A.S., Munareto P. Improved stiction compensation in pneumatic control valves // Computers & Chemical Engineering. 2012. Vol. 38. P. 106–114.