

# Разработка системы автоматической настройки параметров регулятора давления для установки глубинного электроцентробежного насоса

Р. М. Твердохлеб

Санкт-Петербургский горный университет  
императрицы Екатерины II

tverpokhdeb@icloud.com

В. В. Цаплева, Е. В. Мясникова

Пятигорский институт (филиал) СКФУ Северо-Кавказский федеральный университет

vtcapleva@ncfu.ru, emazur@ncfu.ru

**Аннотация.** В процессе эксплуатации установки электроприводного центробежного насоса необходим корректный расчет управляющего воздействия на погружной электрический двигатель. Данная работа посвящена разработке системы автоматизации процесса оптимизации параметров ПИД-регулятора в зависимости от конкретного этапа эксплуатации скважины. При этом вычисление параметров настройки регулятора основано на генетическом алгоритме с учетом результатов измерений, осуществляемых системой погружной телеметрии. Предложенная система позволяет повысить КПД и увеличить срок эксплуатации оборудования.

**Ключевые слова:** генетический алгоритм, установка электроприводного центробежного насоса, погружной электрический двигатель, пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор

## I. ВВЕДЕНИЕ

Методы интеллектуальных измерений и анализа данных позволяют решать такие задачи автоматизации и оптимизации процессов минерально-сырьевого комплекса, как добыча высокопарафинистой нефти [1], разработка месторождений арктического шельфа [2], отработка угольных и газоносных пластов [3,4], регулирование температуры газопроводов [5], управление нефтегазовыми активами [6], оценка себестоимости горных работ [7,8], управление ресурсами подземных вод [9].

В современной нефтяной промышленности электроцентробежные насосы (ЭЦН) играют ключевую роль в поддержании эффективной добычи углеводородов из скважин. Однако, для достижения оптимальной производительности и долговечности оборудования, необходимо обеспечить точную настройку параметров управления, особенно в условиях изменяющихся характеристик эксплуатации скважины.

В контексте этой проблемы, данная статья представляет разработку системы автоматической настройки параметров регулятора давления для установки глубинного электроцентробежного насоса. Основной целью данной работы является разработка метода оптимизации параметров пропорционально-интегрально-дифференцирующего (ПИД) регулятора в зависимости от этапа жизненного цикла и условий эксплуатации месторождения.

Одним из ключевых аспектов проекта является использование генетического алгоритма для вычисления параметров настройки регулятора. Этот метод обеспечивает адаптивную и гибкую стратегию оптимизации, основанную на результатах измерений, собираемых системой погружной телеметрии. Такой подход позволяет системе реагировать на изменения в работе скважины и автоматически корректировать параметры управления для обеспечения оптимальной производительности насоса.

Использование предложенной системы автоматизации не только повышает эффективность работы установки, но и уменьшает необходимость в ручной интервенции оператора. Представленная в статье методология является важным шагом в направлении совершенствования технологий добычи нефти, обеспечивая более эффективное и надежное функционирование скважинных систем.

## II. ОСНОВЫ НАСОСНОГО МЕТОДА ДОБЫЧИ

Применение насосного метода добычи нефти становится актуальным на поздних этапах развития месторождения, когда применение фонтанных методов становится непрактичным или малоэффективным. Этот подход основан на использовании специализированного насосного оборудования, включая электроцентробежные насосы погружного типа.

Установка глубинного электроцентробежного насоса (УЭЦН) представляет собой простую конструкцию, позволяющую осуществлять добычу нефти из скважин на глубинах до 4000 метров. В её состав входит как подземное, так и наземное оборудование, основными элементами которого являются скважинный насос с всасывающим клапаном в нижней части цилиндра и нагнетательным клапаном в верхней части поршня [10].

УЭЦН применяются для откачивания пластовых жидкостей и примесей из скважин. Они отличаются высокой производительностью, способностью работать на больших глубинах, минимальной земной площадью и возможностью использования в морских условиях. Эти установки состоят как из погружных, так и наземных компонентов.

Электронасосы применяются для эксплуатации скважин с низким и высоким дебитом, наклонных,

содержащих газ, с высоким содержанием парафина, а также с высоким уровнем обводнения или наличием солей [10], что является неотъемлемым плюсом.

### III. ВЫДЕЛЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Для структуризации информации об управлении и мониторинга технологического процесса насосного способа добычи нефти на скважине была использована схема [11], представленная на рисунке 1.

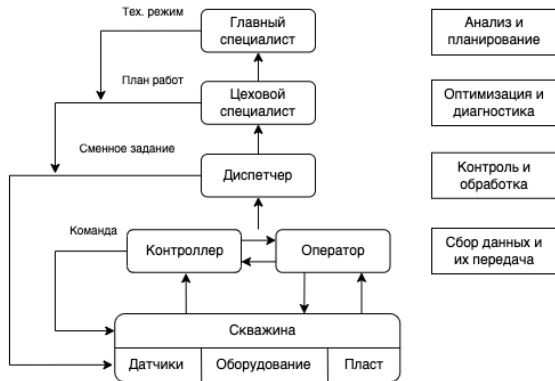


Рис. 1. Система управления скважинами

Так как эксплуатация УЭЦН в режиме ПИД-регулирования особенно актуальна при переходе с высокой добычи на снижение и дальнейшим этапам, то необходим корректный расчет управляющего воздействия на погружной электрический двигатель (ПЭД) для повышения КПД реализации техпроцесса. В качестве входной информации используются данные, приходящие с датчиков системы погружной телеметрии (давление, температура) [12].

В качестве воздействия применяется изменение значение поступающего на ПЭД силы тока, что способствует совершать не только переход из одного режима добычи на другой, но и проводить такие мероприятия как встряхивание и удаление газовых пробок.

Идея предложенного решения заключается в автоматизации процесса оптимизирования параметров ПИД-регулятора в зависимости от конкретного этапа эксплуатации скважины и значений датчиков для повышения КПД и, соответственно, увеличения срока работы оборудования.

Опираясь на схему рисунка 1, планируется разработать и внедрить программное обеспечение (ПО) в систему управления (СУ), которое бы позволило автоматизировать работу оператора, т.е. исключить необходимость ручного регулирования и расчетов оптимизации процесса добычи нефти.

### IV. ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ

Генетические алгоритмы представляют собой эффективный метод решения задач оптимизации и моделирования. Они основаны на идее последовательного подбора, комбинирования и вариации параметров, используя механизмы, аналогичные биологической эволюции [13].

В контексте генетических алгоритмов, генотип объекта обычно представляется в виде битовых строк. Каждому атрибуту объекта в его фенотипе соответствует определенный ген в его генотипе. Ген представляет собой битовую строку фиксированной длины, которая кодирует значение соответствующего признака объекта.

#### А. Основные операторы

За передачу признаков от родителей к потомкам отвечает оператор, известный как скрещивание, или кроссовер [13,14].

Этот оператор играет ключевую роль в генетических алгоритмах, определяя способ комбинирования признаков родителей для создания потомства.

Процесс происходит по заданной последовательности действий:

- Из популяции выбираются две особи, которые будут выступать в качестве родителей.
- Определяется точка раздела в генотипе. Это происходит случайным образом.
- Потомок формируется путем объединения (конкатенации) части генотипа первого родителя до точки раздела с частью генотипа второго родителя после точки раздела.

Следующий генетический оператор, известный как оператор мутации [13,14], выполняет важную функцию поддержания разнообразия в популяции. В процессе применения этого оператора каждый бит в хромосоме имеет определенную вероятность инвертироваться.

Процесс описывается следующим образом:

- Для бита в хромосоме особи определяется вероятность мутации.
- Если случайное число (в диапазоне от 0 до 1) меньше или равно вероятности мутации для данного бита, происходит инверсия этого бита.

#### В. Схема функционирования

Рассмотрим этапы генетического алгоритма [14], реализация которого представлена на рис. 2:

- Инициализация начальной популяции, состоящей из  $pop\_size$  особей.
- Вычисление приспособленности каждой особи ( $fitness\_score$ ).
- Выбор с определенной вероятностью из популяции родителей и выполнение оператора кроссовера.
- Выполнение оператора мутации;
- Переход на следующую эпоху ( $generation + 1$ );
- Если выполнилось условие останова, то осуществляется завершение работы, иначе происходит повторение операций, начиная с вычисления приспособленности.

```

population = initialize_population(pop_size, num_params)
for generation in range(max_generations):
    # Оценка приспособленности
    fitness_scores = [pidtest(G, dt,
                             individual.tolist()) for individual in population]
    # Выбор родителей
    parent_indices = np.random.choice(range(pop_size),
                                      size=pop_size,
                                      replace=True,
                                      p=fitness_scores / np.sum(fitness_scores))
    parents = population[parent_indices]
    # Кроссовер
    offspring = []
    for i in range(0, pop_size, 2):
        child1, child2 = crossover(parents[i], parents[i+1])
        offspring.extend([child1, child2])
    # Мутация
    population = [mutate(child, mutation_rate) for child in offspring]
    
```

Рис. 2. Код реализации генетического алгоритма

## V. РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ

### A. Стек технологий

Язык программирования: Python.

Библиотеки:

- NumPy: работа с многомерными массивами данных и математическими операциями.
- SciPy: работа с сигналами для моделирования динамических систем.
- Matplotlib: визуализация данных в качестве построения графиков переходного процесса.
- Control: инструменты для анализа и проектирования систем управления.

### B. Структура кода

Проект состоит из трех основных модулей:

- Оценка производительности ПИД-регулятора при управлении системой с обратной связью.
- Отслеживание и сохранение истории популяции и соответствующих ей оценок во время выполнения оптимизации.
- Реализация алгоритма генетической оптимизации для настройки параметров ПИД-регулятора.

### C. Математическая модель ПЭД

Передачная функция двигательной системы [15]:

$$G_2(s) = \frac{k_L}{(T_L s + 1)(T_S s + 1)}$$

где  $T_L$  – механическая постоянная времени двигателя,  $T_S$  – электрическая постоянная времени двигателя,  $k_L$  – коэффициент усиления двигателя. В данной статье для наглядности:  $T_L = 12$  с,  $T_S = 2$  с,  $k_L = 1$ .

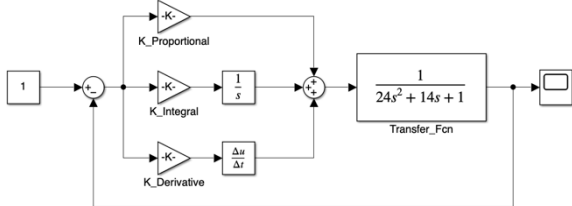


Рис. 3. Структурная схема двигательной системы

### D. Модуль оценки производительности регулятора

Код реализации представлен на рисунке 4.

```

def pid_config(system, time_step, pid_params):
    # Формирование передаточной функции ПИД-регулятора
    proportional, integral, derivative = pid_params
    s = tf('s')
    pid_tf = proportional + integral/s + derivative * s
    # Построение замкнутой системы
    control_loop = series(pid_tf, system)
    closed_loop = feedback(control_loop, 1)
    # Получение переходного процесса
    time_axis = np.arange(0, 100, time_step)
    response, time_axis = step_response(closed_loop, T = time_axis)
    # Расчет управляющего сигнала
    control_signal = lsim(pid_tf, 1 - response, time_axis)
    response = np.reshape(response, (-1, 1))
    control_signal = np.reshape(control_signal, (-1, 1))
    # Расчет критерия производительности
    quality_weight = 1
    control_weight = 0.001
    performance = sum(control_weight * control_signal ** 2
                      + quality_weight * (1 - response) ** 2) * time_step
    return performance
    
```

Рис. 4. Код оценки производительности регулятора

Внутри функции сначала формируется передаточная функция ПИД-регулятора, затем создается замкнутая система с ней и исходной моделью. После этого рассчитывается переходный процесс системы и управляющий сигнал. Далее вычисляется и возвращается критерий производительности системы, который зависит от весовых коэффициентов качества и управления, а также от интегральной суммы квадратов управляющего сигнала и разности между желаемым и фактическим ответом системы.

### E. Настройка и запуск оптимизации

В начале осуществляется настройка параметров системы и генетического алгоритма. Затем создается передаточная функция для системы. Далее выполняется генетический алгоритм, в котором каждая итерация включает в себя оценку приспособленности популяции, выбор родителей, кроссовер, мутацию. После завершения алгоритма выбирается лучшее решение, и оценивается его приспособленность.

В результате определяются лучшие параметры ПИД-регулятора и соответствующая ему приспособленность.

## VI. ТЕСТИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Для начала определим оптимальные параметры ПИД-регулятора с помощью вышеописанного кода несколькими итерациями.

По окончании тройного выполнения секции, получились идентичные результаты:  $K_p = 5,4759$ ;  $K_i = 0,4699$ ;  $K_d = 0,3945$ .

На основе полученных данных функции `history_cost` построена тепловая карта (рис. 5), отображающая уровень затрат (производительности) для соответствующего контроллера на конкретном поколении. Чем темнее цвет, тем меньше затраты, что соответствует лучшей производительности.

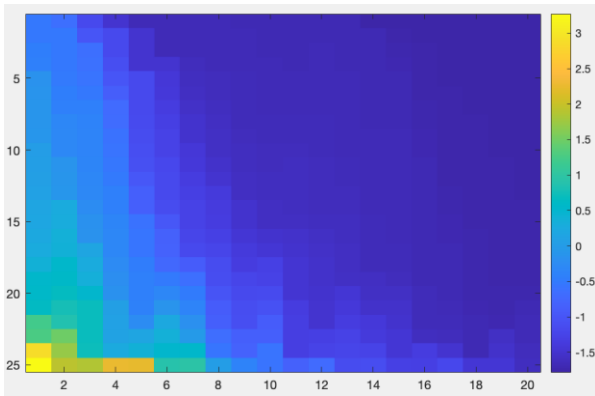


Рис. 5. Тепловая карта производительности

Далее создан график зависимости выходного значения от временного ответа для системы с наилучшим найденным ПИД-контроллером на поколении 20 (рис. 6). Реализуется путем симуляции каждого регулятора и построения графиков переходного процесса замкнутой системы.

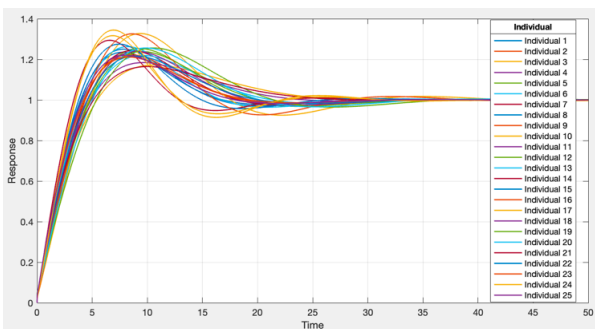


Рис. 6. Графики переходного процесса на поколении 20

Сформирована единая картина закона переходного процесса с небольшими отклонениями. Процесс устойчив, что означает корректность определенных значений коэффициентов ПИД-регулятора.

## VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная методология, основанная на использовании генетического алгоритма, позволяет эффективно оптимизировать параметры управления ПЭД в зависимости от условий эксплуатации и этапа жизненного цикла месторождения. Результаты исследования демонстрируют достоверность получаемых значений и, соответственно, снижение необходимости в ручной коррекции со стороны операторов. Это представляет собой важный шаг в совершенствовании технологий добычи нефти, способствуя увеличению производительности и надежности скважинных систем. Дальнейшие исследования в этом направлении могут включать улучшение алгоритмов оптимизации для достижения еще более высоких результатов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Ilyushin, Y.V., Fetisov, V. Experience of virtual commissioning of a process control system for the production of high-paraffin oil. *Scientific Reports*, 2022, 12(1), 18415.
- [2] Katysheva, E.G. Application of BigData technology to improve the efficiency of Arctic shelf fields development // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 937 (2021). article 042080. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/937/4/042080>
- [3] Sidorenko A.A., Dmitriev P.N., Alekseev V.Yu., Sidorenko S.A. Improvement of techno-logical schemes of mining of coal seams prone to spontaneous combustion and rockbumps. *Journal of Mining Institute*. 2023, p.949-961. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.37>.
- [4] Kazanin O.I., Sidorenko A.A., Sidorenko S.A., Ivanov V.V., Mischo H. High productive longwall mining of multiple gassy seams: best practice and recommendations *Acta Montanistica Slovaca*. 2022. №27. pp. 152-162. <https://doi.org/10.46544/AMS.v27i1.11>.
- [5] Fetisov V.G., Ilyushin Y.V., Vasiliev G.G., Leonovich I.A., Müller J.M., Riazhi M.H., Mohammadi A.H. Development of the automated temperature control system of the main gas pipeline / *Scientific Reports (Springer Nature)*, № 13, V 3092, 2023. pp. 1-14.
- [6] Katysheva E. (2020). Creation of the integrated field model to increase the oil and gas assets management. 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, 20(5.2), 153-160. doi: 10.5593/sgem2020/5.2/s21.018
- [7] Marinin M.A., Marinina O.A., Rakhmanov R.A. (2023). Methodological approach to assessing influence of blasted rock fragmentation on mining costs. *Gornyi Zhurnal*, 2023(9), 28-34. doi:10.17580/gzh.2023.09.04
- [8] Que C.T., Nevskaya M., Marinina O. Coal Mines in Vietnam: Geological Conditions and Their Influence on Production Sustainability Indicators. *Sustainability* 2021, 13, 11800. <https://doi.org/10.3390/su132111800>
- [9] Martirosyan A.V., Martirosyan K.V., Mir-Amal A.M., Chernyshev A.B. Assessment of a Hydrogeological Object's Distributed Control System Stability. *Proceedings of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2022*, 2022, pp. 768–771 <https://doi.org/10.1109/ElConRus54750.2022.9755601>.
- [10] Горлов И.В., Лунькова Л.Г., Мельников Г.С. Современное состояние и перспективы использования способов добычи нефти // *Новые импульсы развития: вопросы научных исследований*. 2020. С. 16-22.
- [11] Воловодов А.В. Интеллектуальный мониторинг и управление скважинными насосными системами // *Инженерная практика*. 2015. №9. С. 16-19.
- [12] Горланов С.Ф., Шалагин Ю.Ю. Технический стандарт к системам погружной телеметрии УЭЦН – ключ к интеллектуализации процессов добычи нефти // *Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса*. 2012. № 3. С. 86-91.
- [13] Клименко Е.Г. Генетический алгоритм как разновидность эволюционного алгоритма // *Радиоэлектроника и информатика*. 2002. № 2 (19). С. 125-129.
- [14] Мищенко В.А., Коробкин А.А. Использование генетических алгоритмов в обучении нейронных сетей // *Современные проблемы науки и образования*. 2011. № 6. С. 76-85.
- [15] Wang Y, Zhang H, Han Z, Ni X. Optimization design of centrifugal pump flow control system based on adaptive control // *Processes* 2021, № 9(9), 1538.