

УНИВЕРСАЛЬНАЯ ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА

Уфимцев А.В.¹, Павленко П.В.², Макаров Д.С.³ Филипас А.А.⁴

¹ Студент гр. 8Т11, e-mail: avu34@tpu.ru

² Студент гр. 8Т12, e-mail: pvp19@tpu.ru

³ Студент гр. 8Т11, e-mail: dsm36@tpu.ru

⁴ Зав. Отделением автоматизации и робототехники, e-mail: filipas@tpu.ru

Томский политехнический университет,

Инженерная школа информационных технологий и робототехники

Аннотация

В работе рассмотрена автоматизированная универсальная гидравлическая установка, способная выполнять широкий спектр гидравлических операций с высокой точностью и эффективностью. Рассмотрены основные конструктивные особенности установки, включая три независимых каскада регулирования давления и утечки на участке трубопровода, математическую модель управления и компоненты гидросистемы. Подробно описан процесс построения математической модели, смоделирована работа помповых насосов по перекачке рабочей жидкости через систему трубопроводов разработанной установки. Обоснована возможность применения универсальной гидравлической установки для решения различных задач в нефтегазовой области, основываясь на принципах физического подобия.

Ключевые слова: математическая модель, переходная характеристика, физическое подобие, гидравлическая установка.

Введение

Представленная в работе универсальная гидравлическая установка. Гидравлические системы широко используются в промышленности, особенно в нефтегазовой сфере, но часто имеют узкую специализацию. Это ограничивает их применение и увеличивает затраты. В связи с этим, разработка универсальной гидравлической установки, способной адаптироваться к различным задачам, является актуальной. Цель данной научной работы – разработка и анализ автоматизированной универсальной гидравлической установки с тремя независимыми каскадами регулирования давления и утечки, обеспечивающей высокую точность и эффективность. В рамках исследования будут рассмотрены: конструктивные особенности установки, математическая модель управления насосами, а также возможность моделирования широкого спектра технологических процессов нефтегазовой отрасли: моделирование колебаний давления высокой и низкой частоты, наведение демпфирующего давления, имитация регулируемой утечки резервуара, ламинарное и турбулентное движение потоков рабочей жидкости.

Описание функционирования установки

Именно на базе физических законов гидравлики, таких как, уравнение Бернулли, основное уравнение гидростатики, гидростатический парадокс, закон Паскаля, уравнение неразрывного потока реализуются эксперименты в системе трубопроводов. Что обуславливает расположение основных элементов и компонентного оснащения установки в три уровня по вертикали. Так под столом установки расположен бак первично приема рабочей жидкости, откуда посредством насосов, находящихся на втором уровне, так же называемом основным каналом проведения эксперимента, перекачивается по замкнутой системе трубопроводов установки. Центральным элементом уровня пусконаладки является основной трубопровод системы, оснащенный 3 комплектами элементов, включающих в себя датчик давления, датчик расхода жидкости, преобразователь давления, электромагнитный клапан. Каждый из таких комплектов позволяет сформировать независимый каскад управления гидроаккумулятором –

резервуаром хранения жидкости, который расположен на 3 уровне установки. Независимость управления достигается путем регулирования проходного сечения клапана основного трубопровода системы, а также клапана трубопровода регулируемой утечки из гидроаккумулятора, самостоятельно и отдельно для каждого гидроаккумулятора. Трёхмерная модель установки изображена на рис.1.



Рис. 1. Универсальная гидравлическая установка

Математическая модель установки

В специализированном отечественном программном обеспечении было выполнено математическое моделирование системы управления работой автоматизированной установки гидродинамических процессов высоких порядков. Состоит из нескольких основных математических блоков, некоторые из которых также имеют несколько математических моделей внутри себя. Структурная схема математической модели гидравлической части установки представлена на рис.2.

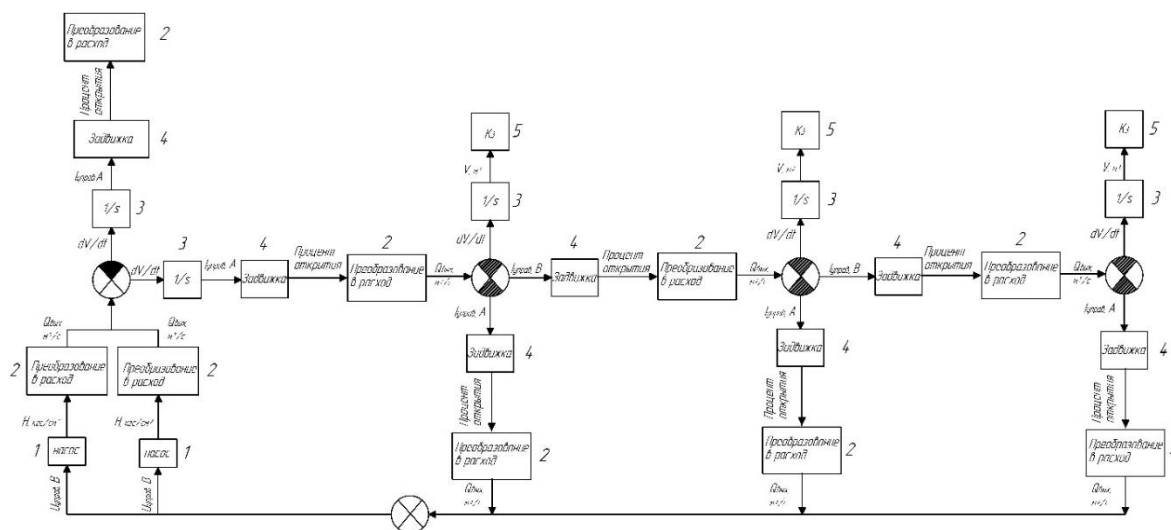


Рис. 2. Структурная схема математической модели универсальной гидравлической установки

Представленная схема состоит из следующих блоков:

1. Блок 1 – Помповый насос.
2. Блок 2 – Датчик расхода, отвечающий за преобразование степени открытия собственной задвижки электромагнитного клапана в соответствующее значение объемного расхода рабочей жидкости на выходе задвижки.
3. Блок 3 – Интегратор.

Блок интегратора в разработанной математической модели выполняет функцию накопления и отслеживания изменения объёма жидкости на исследуемом участке трубопровода во времени, на основе разницы значений объемного расхода жидкости между входящими и исходящими потоками. Применение такого подхода позволяет вычислить объём жидкости в системе в любой момент времени, на основе следующих уравнений (1), (2):

$$\frac{d}{dt}V(t) = Q_{\text{вх}}(t) - Q_{\text{вых}}(t), \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt}V(t) = \int (Q_{\text{вх}}(t) - Q_{\text{вых}}(t)) dt, \quad (2)$$

где $V(t)$ – объём среды в гидроаккумуляторе, $\frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$.

$Q_{\text{вх}}(t)$ – жидкость, поступающая в гидроаккумулятор, $\frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$.

$Q_{\text{вых}}(t)$ – регулируемая утечка жидкости из гидроаккумулятора, $\frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$.

4. Блок 4 – Задвижка, модель которой представляет собой систему блоков, представленную на рисунке 5.1.2.

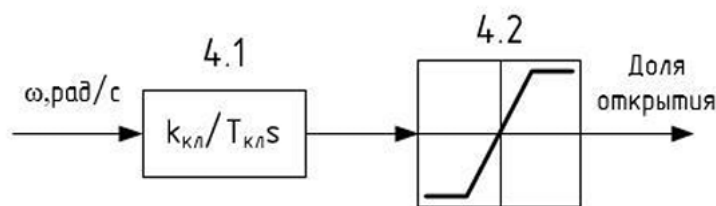


Рис. 3. Структурная схема задвижки (электромагнитного клапана)

Блок 4.1 – передаточная функция задвижки электромагнитного клапана, где $\omega = 0,0002 \text{ с}^{-1}$, такая величина обеспечивает полное открытие клапана за 16 секунд в автоматическом режиме, расход жидкости через проходное сечение клапана принято считать линейным [4].

Блок 4.2 – ограничительное звено, которое применяется в модели, так как доля открытия клапана является числом из диапазона от 0 до 100 процентов открытия.

Расход на выходе из проходного сечения электромагнитного клапана определяется на основе базовых законов гидродинамики.

5. Блок 5 – коэффициент преобразования объёма в уровень. Расход на выходе резервуара накопления рабочей жидкости, которым в гидравлической системе разработанной установки является гидроаккумулятор определяется по формуле:

$$Q_{\text{вых}}(t) = S * \sqrt{2g * h(t)}, \quad (3)$$

где g – ускорение свободного падения;

h – высота столба жидкости в гидроаккумуляторе (уровень);

a – коэффициент открытия клапана в долях;

k – коэффициент пересчета доли открытия клапана в площадь сечения оттока, равный $0,0004 \text{ м}^2$, так как при диаметре проходного сечения спускного клапана $0,02 \text{ м}$ (20 мм) в открытом состоянии, площадь полного сечения соответствует $0,0004 \text{ м}^2$;

Для детального анализа и моделирования сложной гидравлической системы, необходимо разделить её на отдельные, взаимодействующие подсистемы, каждую из которых можно описать с помощью своей математической модели. В рамках данного исследования, следует выделить несколько основных математических блоков, каждый из которых выполняет свою специфическую роль в общей модели.

По структурному строению разработанную математическую модель можно разделить на пять основных математических блоков:

1. Математическая модель помповых насосов.
2. Математическая модель гидроаккумулятора 1 участка.

3. Математическая модель гидроаккумулятора 2 участка.
4. Математическая модель гидроаккумулятора 3 участка.
5. Математическая модель регулируемых утечек.

Разделение системы на отдельные блоки позволяет упростить анализ, более точно моделировать поведение каждого элемента и исследовать их взаимное влияние.

Математические модели двух помповых насосов являются идентичными друг другу и представлены на рис.3.

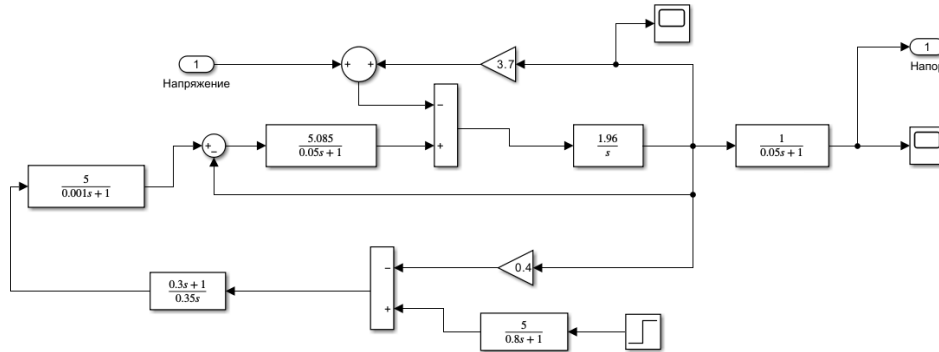


Рис.3. Математическая модель помпового насоса

Уставкой системы является постоянное значение, которое представляет заданное значение избыточного давления изменяемое в атмосферах, что по своей сути является задающим воздействием для представленной модели. Сумматор складывает или же вычитает входные сигналы в зависимости от собственного знака. В данной модели представлено два различных сумматора – один выполняет функцию сложения двух входных сигналов, второй вычитает второй вход из первого и выдает результат, тем самым происходит вычитание обратной связи для формирования сигнала ошибки управления.

Далее идет ряд передаточных функций первого порядка, моделирующий динамику процесса. В данных функциях в числителе представлен коэффициент усиления, определяющий насколько сильно выходной сигнал будет реагировать на изменение входного. Значение в знаменателе представляет собой оператор Лапласа s и постоянную времени. Постоянная времени, определяет скорость реакции системы, характеризует инерцию процесса. Устанавливается следующая зависимость: чем меньше значение постоянной времени, тем быстрее реагирует система.

Поочередно рассмотрим данные передаточные функции представленных блоков.

$$W(s) = \frac{5.085}{0.05s + 1} \quad (4)$$

Таким образом блок моделирует динамику двигателя насоса, например, реакцию на изменение управляющего сигнала. Коэффициент усиления определяет величину реакции, а постоянная времени – инерцию.

Передаточная функция, описываемая формулой 5 представляет собой интегратор – это модель механической инерции двигателя и его взаимодействия с жидкостью

$$W(s) = \frac{1.96}{s} \quad (5)$$

В формуле 6 представлена передаточная функция, которая моделирует инерцию насоса или его выходного контура, а именно, скорость изменения давления в системе.

$$W(s) = \frac{1}{0.05s + 1} \quad (6)$$

В формуле 7 описано преобразование сигнала скорости в физическую величину, необходимую для обратной связи, в нашем случае, давление. Малая значение постоянной времени показывает, что это преобразование происходит быстро.

$$W(s) = \frac{5}{0.001s + 1} \quad (7)$$

Передаточная функция 8 является ПИ-регулятором, который обеспечивает обратную связь для управления скоростью вращения двигателя.

$$W(s) = \frac{0.3s + 1}{0.35s} \quad (8)$$

Блок Step генерирует ступенчатое изменение сигнала, который используется как управляющее воздействие на систему.

Блок Gain – это коэффициент усиления, который определяет, насколько сильно выходной сигнал будет реагировать на изменение входного. В данной модели его назначение усиливать сигнал для ПИ- регулятора.

Заключение

В рамках проведенного исследования была разработана и проанализирована автоматизированная универсальная гидравлическая установка, отличающаяся наличием трех независимых каскадов регулирования давления и утечки. Применённые технические решения обеспечивает высокую точность и эффективность выполнения широкого спектра гидравлических операций, что было подтверждено путем математического моделирования.

В процессе исследования была разработана математическая модель управления, а также смоделирована работа помповых насосов по перекачке рабочей жидкости через систему трубопроводов. Полученные результаты позволили обосновать возможность применения данной установки в нефтегазовой области, основываясь на принципах физического подобия.

Разработанная универсальная гидравлическая установка обладает потенциалом для снижения затрат и повышения эффективности в различных промышленных приложениях. Данная работа является часть цикла статей направленных на дальнейшее исследований в области гидравлических систем.

Список использованных источников

1. Уфимцев А.В. Установка физического подобия определения утечек на участке нефтепровода : сборник трудов VII Всероссийская молодежная научная конференция «Актуальные проблемы нефти и газа», 16-18 октября 2024 – Москва. – С. 96-100.

2. Уфимцев А.В., Филипас А.А. Разработка трёхуровневой системы автоматизации для управления технологическими процессами нефтегазовой отрасли материалы VI Всероссийская (с международным участием) научно-практическая конференция «Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники», 7-8 ноября 2024 – Казань. – С. 528-534, Том № 1.

3. Федотов А.Д. Автоматизированный исследовательский стенд физического подобия трубопровода с имитацией утечек: бакалаврская работа / А.Д. Федотов; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Инженерная школа информационных технологий и робототехники (ИШИТР), Отделение автоматизации и робототехники (ОАР) ; науч. рук. А.Г. Зибзеев. – Томск, 2022.

4. Кожевникова Н. Г. Гидравлика и гидравлические машины. Лабораторный практикум : учебное пособие / Н.Г. Кожевникова, А.В. Ецин, Н.А. Шевкун, А.В. Драный. – Санкт-Петербург : Лань, 2016. – 352 с. (Лань : электронно-библиотечная система). – URL: e.lanbook.com/book/76272 (дата обращения: 29.01.2025).

5. Ваганов, А.Б. Применение методов вычислительной гидродинамики в курсах машиностроительной гидравлики / А.Б. Ваганов, И.Д. Краснокутский // Концепт. – 2015. – № 7. – С. 1-9. – Санкт-Петербург : Лань: электронно-библиотечная система. – URL: e.lanbook.com/journal/issue/297267 (дата обращения 28.02.2025)