

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ Н. Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

Кафедра математической кибернетики и компьютерных наук

**РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
ДЛЯ НЕИНВАЗИВНОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ  
ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЯ УРОВНЯ ЖИДКОСТИ В ЗАКРЫТЫХ  
ТРУБОПРОВОДАХ И ЕМКОСТЯХ**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 273 группы  
направления 02.04.03 — Математическое обеспечение и администрирование  
информационных систем  
факультета КНиИТ  
Качанова Михаила Олеговича

Научный руководитель

к. т. н., доцент

\_\_\_\_\_

Д. Ю. Петров

Заведующий кафедрой

к. ф.-м. н., доцент

\_\_\_\_\_

А. С. Иванов

Саратов 2020

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Измерение уровня жидкости в цилиндрических емкостях далеко не новая задача. Существует масса решений и готовых продуктов, использующих различные методы. Но существуют области, где существующие методы не полностью удовлетворяют, или не удовлетворяют вообще. Например, в трубопроводах нефти и газа по всей России нужны универсальные решения, которые должны недорого стоить и не требовать длительной установки и тщательного обслуживания.

Сейчас на рынке предложены регистраторы уровня и уровнемеры инвазивного типа, то есть врезающиеся в емкость, что в различных случаях либо очень дорого, либо требует много сил и времени на установку, либо не проходит по всем строгим параметрам, либо все вместе. Несмотря на это такие решения все равно используются на трубопроводах, хотя это уже устаревшие технологии.

Существует теория, что можно использовать уровнемеры нового типа - неинвазивного, то есть не соприкасающийся с измеряемой жидкостью. Этого можно достигнуть благодаря ультразвуковой технологии. Согласно сайту "Rusautomation.ru" [1], применений у таких изделий может быть несколько: от измерения скорости потока жидкости в резервуаре до контроля уровня сырья для биогаза.

Также для регулирования уровня используются алгоритмы с ПИД-регулятором, что в некоторых случаях вызывает в процессе управления уровнем некоторые трудности, такие как сильные колебания (если не использовать нечеткую логику, которая как раз не приводит к колебаниям).

**Цель магистерской работы** — создание программно-технического обеспечения для системы регистрации уровня на основе неинвазивного способа при помощи группы датчиков, а так же контроля уровня на основе нечеткой логики с помощью специального клапана (крана) в резервуаре с протекающей жидкостью.

Поставленная цель определила **следующие задачи:**

1. проанализировать литературу, связанной с нечеткой логикой и нечетким контроллерам и рассмотреть готовые решения, основанные на контроле уровня;
2. рассмотреть программные средства для работы с нечеткой логикой;

3. построить техническое обеспечение контроля жидкости: сконструировать плату, достроить всю периферию, подключиться платой к компьютеру, к ультразвуковым датчикам и клапану;
4. написать программное обеспечение для получившегося контроллера: библиотеки тактирования, таймеров, интерфейсов связи и так далее;
5. построить абстрактную модель нечеткого контроллера уровнемера в выбранной программной среде;
6. произвести кодогенерацию получившейся абстрактной модели, дописать программу так, чтобы она работала с ранее реализованным контроллером, проверить работоспособность системы контроля уровня уже живую, а не на абстрактном уровне;
7. написать программное обеспечение для контроллера для определения уровня жидкости в резервуаре при помощи пары ультразвуковых датчиков уровня;
8. объединить две получившиеся функции в одну программу, сделать удобный и информативный пользовательский интерфейс;
9. сделать выводы на основе проведенной работы.

**Методологические основы.** Основы нечеткой логики были изучены в трудах В.Г. Чернова [2]. Ее применение в сфере нефтедобычи содержится в статье А.М. Сагдатуллина [3]. Теория по приборам измерения уровня изучена в трудах В.С. Жданкина [4].

**Практическая значимость магистерской работы.** В таких сферах, как нефтедобыча, используются устаревшие технологии измерения уровня, основанные на инвазивном способе, то есть датчики и приборы должны врезаться в корпус емкости, что очень трудозатратно, а так же в этих системах простой трубопровода для обслуживающих и ремонтных работ может осуществляться редко. Предложенный неинвазивный способ с датчиком нового поколения, который может мерить толстые стены емкостей может решить эту проблему, так как ремонтные работы, замену, обслуживающие работы, связанные с уровнемерами можно будет проводить, не трогая сам трубопровод.

**Структура и объем работы.** Магистерская работа состоит из введения, 2-ух разделов, заключения, списка использованных источников и 2-ух приложений. Общий объем работы – 74 страницы, из них 55 страниц – основное содержание, включая 68 рисунков, цифровой носитель в качестве приложения,

список использованных источников информации – 22 наименования.

## **1 Краткое содержание работы**

**Первый раздел «Средства нечеткого управления и датчики уровня»** посвящен теоретическим основам и анализу существующих средств для решения поставленных задач. В нем описаны:

- необходимый математический аппарат по нечеткой логике для реализации его на практике;
- обзор программных сред для создания абстрактной системы с нечетким контроллером;
- анализ и обзор существующих способов и датчиков измерения уровня во многом основываясь на источнике «Измерение уровня. Методы, способы измерения уровня. Выбор уровнемера» [5];
- анализ существующих алгоритмов фильтрации значений.

В итоге был сформирован математический аппарат для создания системы, основанной на нечеткой логике. Также на основе проанализированных данных была выбрана программная среда LabVIEW, так как она имеет возможность кодогенерации, удобная в визуализации, а что самое главное - имеет бесплатную студенческую версию.

**Второй раздел «Разработка системы регистрации и контроля уровня жидкости»** посвящен описанию процесса разработки интеллектуальной неинвазивной системы регистрации и контроля уровня жидкости в емкостях, а также приведены примеры ее работы.

Для работы имелось:

- резервуар с протекающей жидкостью (водой) с толщиной стенок приблизительно в 20 миллиметров;
- управляемый клапан (кран), чтобы регулировать поток жидкости;
- два ультразвуковых датчика - уровнемера.

Имеется задача сконструировать плату с микроконтроллером и периферией, а так же управляющую программу к ним и пользовательский интерфейс. Измерение уровня должно происходить с помощью двух ультразвуковых датчиков (принцип описан ниже), значение будет фильтроваться для избежания шумов. Также из полученных прежде данных уровня система должна регулировать уровень жидкости с помощью специального запорного крана. Также в связи с особенностями трубопровода необходимо регулировать очень плавно и точно, поэтому было необходимо применение нечеткой логики. Программа

должна давать возможность выбирать требуемый уровень, схематично показывать графики изменения потока, а так же визуально отображать все участвующие элементы системы на экране.

Сначала была разработана система регистрации уровня с одним датчиком. Была сконструирована плата и вся периферия (с помощью шины I2C и последовательного протокола USART), на реальном объекте была проверена работоспособность системы, но точность не была удовлетворительной (погрешность около 10 процентов).

В данном случае датчики могут использоваться в парном режиме:

- Датчик может выступать как излучатель;
- Датчик может выступать как приемник;
- Обращение к ним выглядит как черный ящик, обработка сигнала происходит внутри датчиков, они могут выдавать следующую информацию:
  - запрос на излучение сигнала;
  - запрос на прием сигнала;
  - получение спектра сигнала;
  - отправка спектра с последующей обработкой (обработка происходит на встроенной плате датчика) и получение значение уровня.
- В парном режиме один датчик выступает как излучатель, а другой - как приемник, а в одиночном все эти функции выполняет один датчик.

После небольшого количества опытных испытаний (но стоит заметить, что эксперименты происходили в идеальных условиях, с откалиброванными датчиками), была найдена зависимость того, как необходимо посылать сигнал. Суть заключалась в том, что датчики должны находиться друг над другом. Сначала производится отдельный анализ уровня для каждого датчика, чтобы определить, на каком примерно уровне находится вода. Если определено, что уровень воды находится между ними, то один из датчиков, являющийся излучателем, излучает сигнал, а приемник принимает его через несколько миллисекунд (выяснено опытным путем и с помощью соответственной литературы), а потом производится та же схема, только наоборот. Далее находится среднее из этих двух значений.

На рисунке 1 показаны результаты этих исследований. Метод с группой ультразвуковых датчиков показал себя лучше, чем один обособленный уровнемер, так как у него меньше погрешность.

1 sensor	2 sensors (emitter-receiver)
height: 191	height: 201
height: 192	height: 198
height: 201	height: 200
height: 195	height: 199
height: 209	height: 202
height: 207	height: 203
height: 201	height: 199
height: 194	height: 200
height: 195	height: 200
height: 207	height: 201
height: 200	height: 200
height: 209	height: 199
height: 199	height: 198
height: 198	height: 199
height: 199	height: 197
height: 208	height: 203
height: 192	height: 200
height: 190	height: 199
height: 199	height: 198
height: 208	height: 202
height: 204	height: 202
height: 205	height: 201

Рисунок 1 – Сравнение подходов

Но далее было принято решение улучшить алгоритм определения уровня, а так же добавить фильтр для значений, чтобы отсеять выбросы и погрешности датчиков (шумы).

Раннее последовательность действий была следующей:

1. Первый датчик в одиночном режиме (выступал как приемник и излучатель) выдавал спектр и затем обрабатывал его и было получено значение уровня;
2. Для второго датчика делалось то же самое;
3. По уровню выяснялось, какой датчик находится ниже, какой выше.
4. Если значение было выше верхнего датчика, либо ниже нижнего, то использовать далее пару неэффективно и можно остановиться на значении ближайшего к уровню датчика;
5. Если значение было в промежутке между датчиками, то нижний становился излучателем, верхний - приемником (с задержкой, вычисленной опытным путем), и брался спектр этого измерения и находилось среднее арифметическое из значений уровня этого спектра и спектра, полученного с нижнего датчика.

Опытным путем была разработана модификация этого алгоритма:

На последнем шаге теперь берется спектр для верхнего датчика, как излучателя и нижнего, как приемника (спектр **1**), и наоборот, излучатель - нижний, приемник - верхний (спектр **2**). Далее из спектра **1** вычитается спектр **2** и получается разница спектров **3**. Эта разница спектров **3** прибавляется к спектру нижнего датчика в одиночном режиме, и получается более точное

значение.

Для данного резервуара была измерен уровень (55 сантиметров) неподвижной воды для демонстрации увеличения точности (см. рис. 2).

height: 5493mm	height: 5499mm
height: 5511mm	height: 5503mm
height: 5503mm	height: 5510mm
height: 5495mm	height: 5505mm
height: 5493mm	height: 5503mm
height: 5489mm	height: 5499mm
height: 5502mm	height: 5495mm
height: 5500mm	height: 5496mm
height: 5501mm	height: 5501mm
height: 5495mm	height: 5490mm
height: 5503mm	height: 5500mm
height: 5506mm	height: 5501mm
height: 5510mm	height: 5500mm
height: 5494mm	height: 5504mm
height: 5495mm	height: 5495mm
height: 5506mm	height: 5499mm
height: 5501mm	height: 5502mm
height: 5499mm	height: 5503mm
height: 5501mm	height: 5500mm
height: 5501mm	height: 5501mm
height: 5496mm	height: 5499mm
height: 5493mm	height: 5511mm

Рисунок 2 – Слева - результат старого алгоритма, справа - нового

Также был добавлен фильтра среднего арифметического (описанный в первой главе) для отсека выбросов. Как видно на графике (см.рис 3), данные модификации (новый алгоритм и фильтрация значений) действительно увеличили точность определения уровня.



Рисунок 3

На данном этапе была построена система регистрации уровня с помощью группы ультразвуковых датчиков.

Следующим шагом было создание абстрактной модели контроля уровня жидкости с помощью специального клапана (крана). Система создавалась в

программной среде LabVIEW.

Сначала был построен нечеткий контроллер для регулирования уровня жидкости.

В нем входы и выходы задаются лингвистическими переменными. В среде LabVIEW для этой переменной сразу задается соответствие в таблице принадлежности (см. рис. 4). В этой таблице некоему диапазону присваивается свое значение.

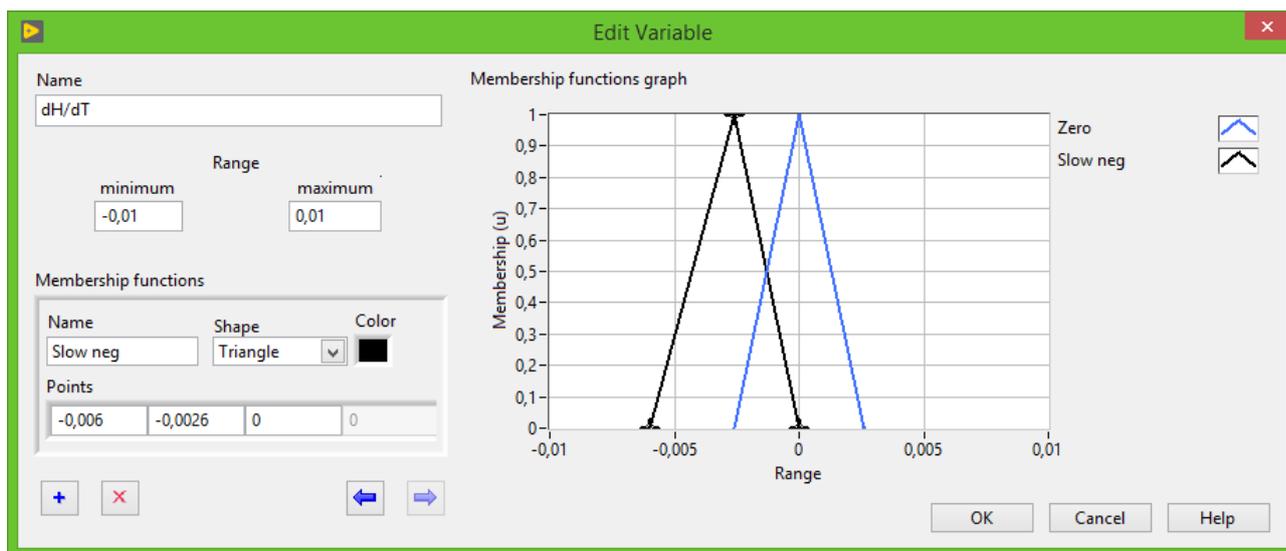


Рисунок 4 – Создание таблицы соответствия лингвистической переменной

Было построено 3 лингвистические переменные:

- Первый вход (переменная скорости изменения уровня).
- Второй вход (переменная отклонения уровня от желаемого).
- Один выход (изменение потока).

На основе этих переменных была создана база правил, состоящая из 25 правил.

В итоге получилась следующая блочная диаграмма со всей логикой системы (см. рис. 5). На ней также были добавлены выходы для лицевой панели.

Далее была сделана лицевая панель для визуализации и управления процессом (см. рис. 6).

В ней представлены:

- Сам резервуар, его уровень и кран (красный - закрыт, зеленый - открыт).
- Требуемый уровень жидкости (Tank Set Point), который можно ввести с клавиатуры или ползунком.
- Веса всех двадцати пяти правил (rule weights).

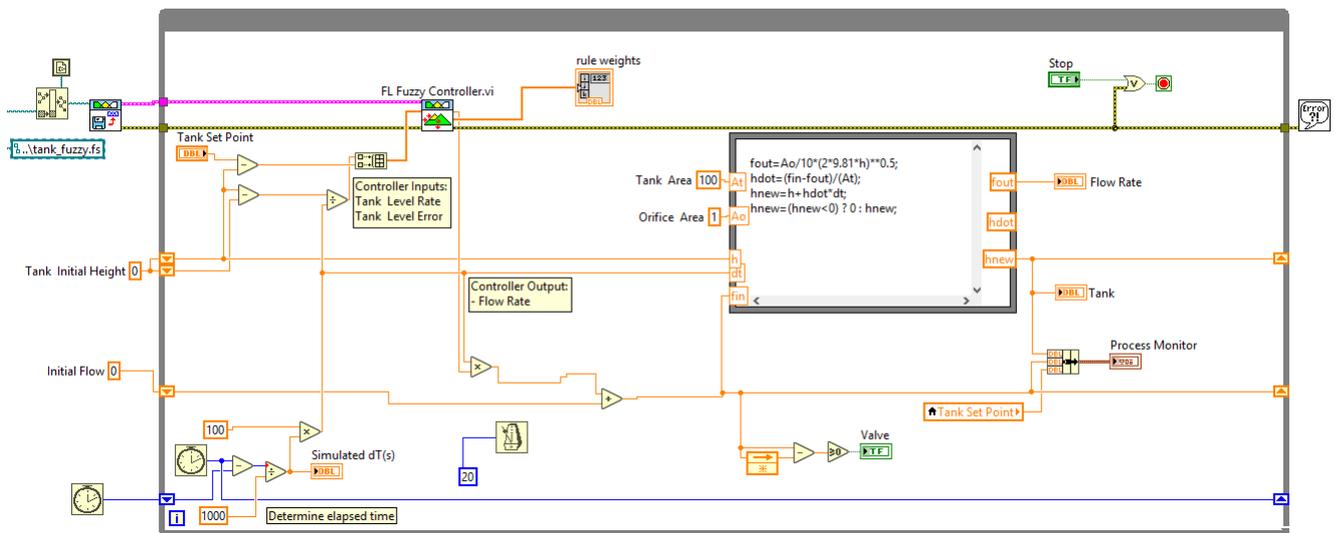


Рисунок 5 – Блочная диаграмма

- Частота обновления симуляции в секундах (dT).
- График (Process Monitor), который показывает скорость потока (Flow Rate), уровень жидкости (Level Tank) и желаемый уровень жидкости (Tank Setpoint).

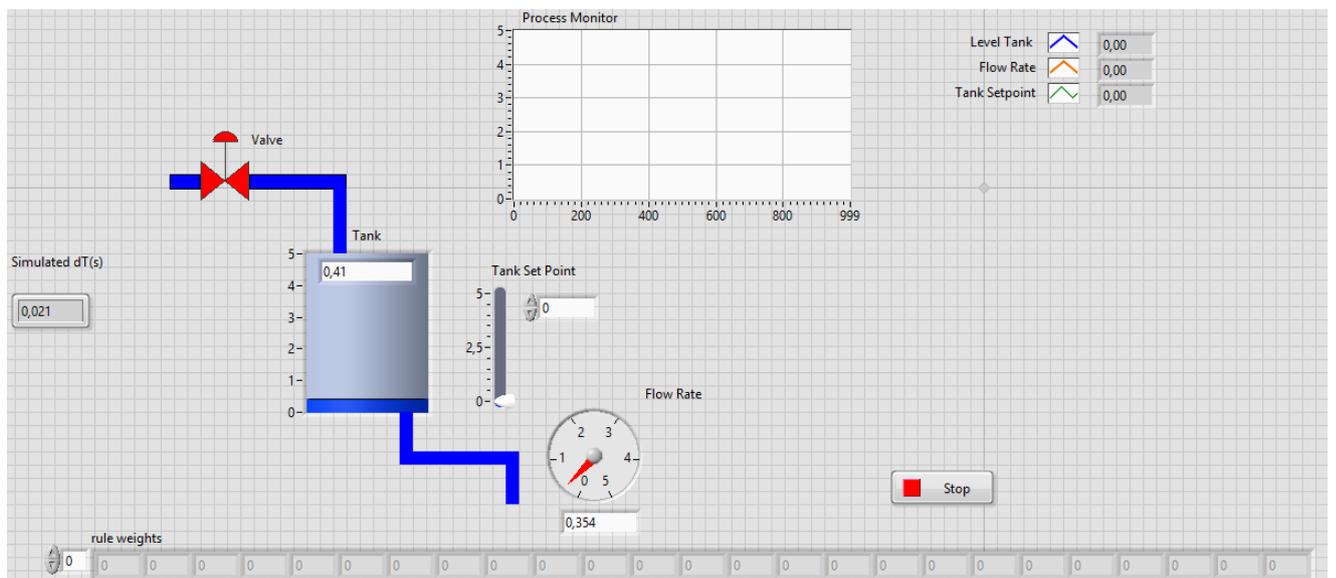


Рисунок 6 – Лицевая панель

Таким образом, получился прототип ПО, который работает на нечетком контроллере.

Следующим шагом был перенос и оптимизация этой абстрактной модели на язык C++ и реальный тест контроля уровня.

После реализации встроенной в LabVIEW кодогенерации были написаны следующие библиотеки:

- фреймворк для обмена сообщениями с краном и акустическими датчиками (communication).
- фреймворк инициализации входов и выходов (iopin).
- фреймворк для правильного вычисления математических операций (template\_util).

Средства связи с триггером, связанным с клапаном, контроллером счетчика потока и с пользователем посредством ПК: библиотеки I2C и USART.

Запорный клапан, к которому крепится триггер прикреплен к закрытой емкости с толщиной стенки в 20 миллиметров. Визуально было проверено, что управление клапанов проводится правильно и без ошибок. Модель управления уровнем жидкости была перенесена на язык C++, связана с реальным датчиком и контроллером.

Наконец, было реализовано десктопное приложение в программной среде QT Creator с несколькими пользовательскими библиотеками и фреймворками для правильного соединения с контроллером.

Финальный вид программы программы представлен на рис. 7.

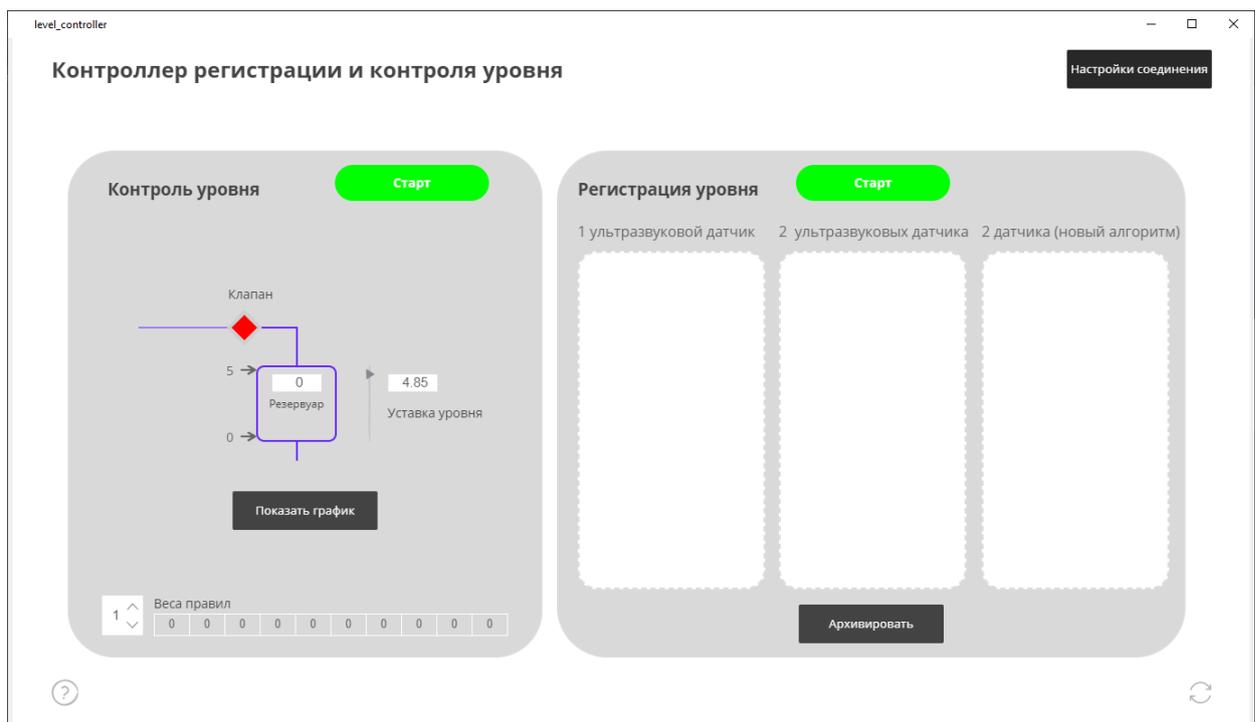


Рисунок 7 – level\_controller

В ней присутствует следующий функционал:

- кнопка Connect Controller для подключения к контроллеру и настройки акустических датчиков;
- визуализация закрытого резервуара с протекающей водой и клапаном;

- визуализация весов нечеткого контроллера;
- описание программы (значок вопроса);
- два поля для вывода значений уровня жидкости в резервуаре с помощью одного датчика и пары датчиков;
- две кнопки Start, которые начинают работу определения уровня и изменения уровня соответственно;
- кнопка Archive, которая сохраняет результаты измерений уровня в csv файл;
- кнопка останова и сброса всех параметров (снизу справа).

Работающая программа после настройки контроллера выглядит следующим образом (см. рис. 8).

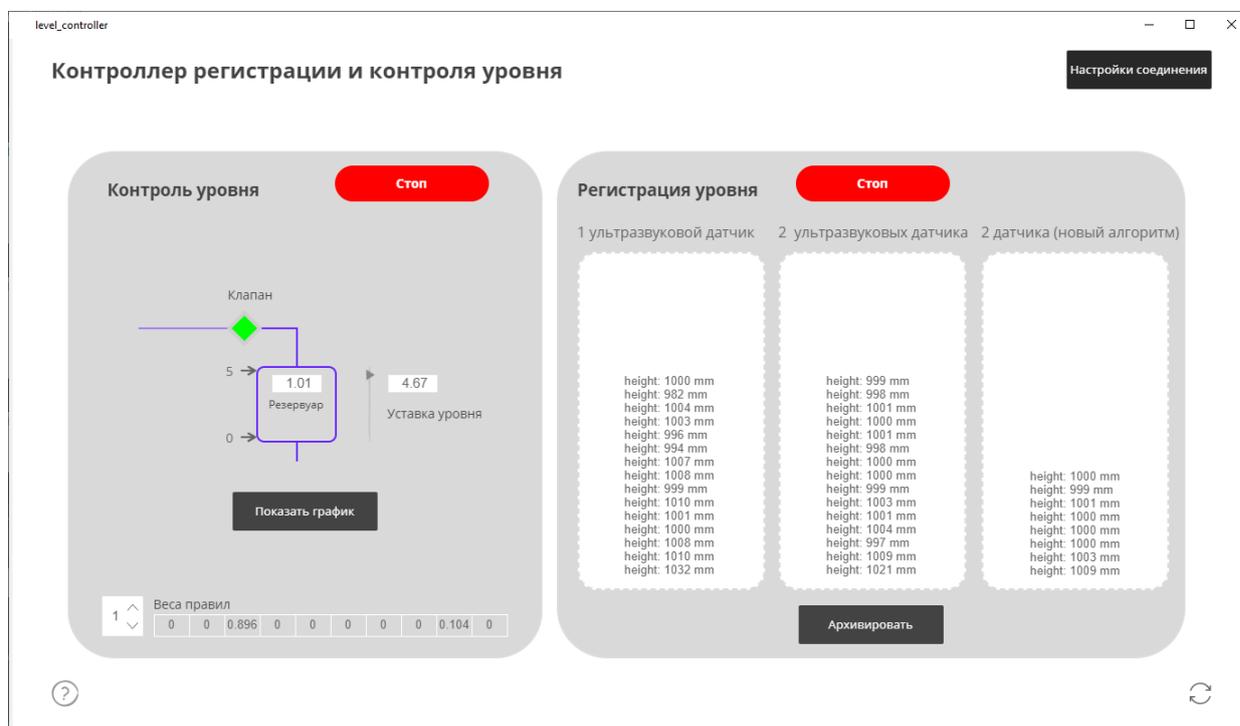


Рисунок 8 – Работающая программа

Как мы видим, все элементы функционируют верно:

- при запуске управления уровнем уровень начал подниматься (с 1000 до 1019мм), а также клапан открыт (горит зеленым цветом);
- веса лингвистических переменных также правильно распределяются;
- на графике видно, как уровень меняется плавно (см. рис. 9);

На данном этапе вся система была построена и все поставленные в задачах работы функции выполняются. Данный проект удовлетворяет всем требованиям, поставленным в начале работы.



Рисунок 9 – График зависимостей

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В результате была построена система регистрации и контроля уровня жидкости в закрытом резервуаре, функции которой были протестированы на реальной емкости. Предложенный метод контроля, основанный на нечеткой логике, дал свои результаты: точность, плавность, надежность. Способ регистрации уровня с помощью группы ультразвуковых датчиков так же показал эффективность и точность.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Применения ультразвуковых уровнемеров для жидкостей [Электронный ресурс]. — URL: <https://rusautomation.ru/primeneniya-ultrazvukovyh-urovnever> (Дата обращения 20.05.2020). Загл. с экр. Яз. рус.
- 2 *В.Г.Чернов*,. Нечеткие контроллеры. Основы теории и построения / В.Г.Чернов. — Владимир: Владимирский государственный университет, 2003.
- 3 *А.М.Сагдатуллин*,. Разработка многомерного регулятора на базе нечеткой логики для поддержания постоянства технологического процесса транспорта нефти / А.М.Сагдатуллин // *Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности*. — 2014. — Vol. 7. — Pp. 35–39.
- 4 *В.С. Жданкин*,. Приборы для измерения уровня / В.С. Жданкин // *СТА*. — 2002. — Vol. 3. — Pp. 6–19.
- 5 Измерение уровня. Методы, способы измерения уровня. Выбор уровнемера [Электронный ресурс]. — URL: [https://eti.su/articles/izmeritelnaya-tehnika/izmeritelnaya-tehnika\\_1520.html](https://eti.su/articles/izmeritelnaya-tehnika/izmeritelnaya-tehnika_1520.html) (Дата обращения 20.05.2020). Загл. с экр. Яз. рус.