

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
Институт машиностроения, материалов и транспорта  
Высшая школа автоматизации и робототехники

## **ОТЧЁТ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ №3**

**Разработка нечёткой системы регулирования  
уровня жидкости в резервуаре**  
по дисциплине «Нечёткие системы обработки информации  
в мехатронике и робототехнике»

Выполнил  
студент гр. 3341506/10401

Паньков И.С.

Проверил  
ассистент

Абросимов Э.А.

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Санкт-Петербург

2022

## Цель работы

Цель работы — ознакомить с особенностями разработки нечётких регуляторов динамических систем и изучить основные принципы использования систем нечёткого вывода в графической среде моделирования Simulink.

## Задание

1 Создать в среде Simulink модель нечёткой системы регулирования уровня жидкости в резервуаре со следующими параметрами:

$$S_{\text{tank}} = 8,0 \text{ м}^2, \quad K_{\text{gate}} = 0,8 \text{ м}^3/(\text{рад} \cdot \text{с}), \quad K_{\text{flow}} = 0,2 \text{ м}^2. \quad (1)$$

Настроить блок Signal Builder для выдачи следующего воздействия:

$$h_d(t) = \begin{cases} h_0 = 0 \text{ м}, & 0 \leq t < t_0, \quad t_0 = 1 \text{ с} \\ h_1 = 1 \text{ м}, & t_0 \leq t < t_1, \quad t_1 = 60 \text{ с} \\ h_2 = 0,4 \text{ м}, & t_1 \leq t < t_2, \quad t_2 = 100 \text{ с} \end{cases} \quad (2)$$

Настроить блок Saturation для ограничения допустимого уровня жидкости в резервуаре:

$$h \in [0; 100] \text{ м}. \quad (3)$$

2 Разработать систему нечёткого вывода, реализующую требуемый закон регулирования. В качестве параметра блока Fuzzy Logic Controller установить имя этого нечёткого регулятора в рабочем пространстве среды MATLAB.

3 Оценить адекватность функционирования полученной системы нечёткого вывода при помощи средств просмотра правил нечёткого вывода (Rule Viewer) и поверхности «входы – выход» (Surface Viewer).

4 Запустить модель в среде Simulink и оценить качество переходного процесса при ступенчатом задающем воздействии.

5 Оценить работу нечёткого регулятора при изменении параметров объекта управления в пределах  $\pm 20\%$  и  $\pm 60\%$ .

6 Исследовать влияние типа и параметров функций принадлежности термов входных переменных на характер поверхности «входы – выход» нечёткого регулятора и качество переходного процесса системы управления.

7 Исследовать влияние весовых коэффициентов правил нечётких продукций на характер поверхности «входы – выход» нечёткого регулятора и качество переходного процесса системы управления.

8 Запустить демонстрационный пример MATLAB «Simulate Fuzzy Inference System». Сравнить находящуюся в нём систему с той, которая исследовалась в данной работе. Выяснить назначение элементов системы демонстрационного примера, пользуясь справочной системой среды MATLAB.

9 Сделать выводы по проделанной работе.

10 Подготовить отчёт по лабораторной работе.

## Ход работы

Блок-схема исследуемой системы управления представлена на рисунке 1.

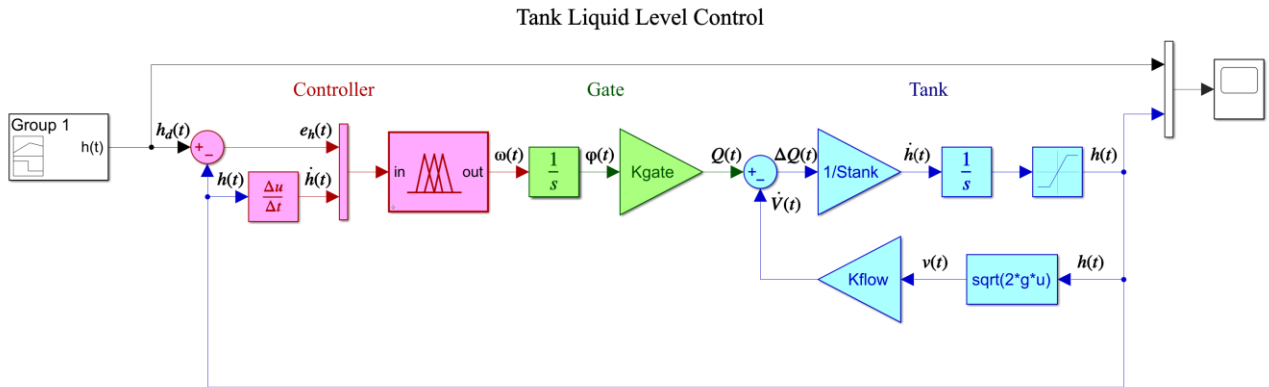


Рисунок 1 — Блок-схема системы управления

Данная система состоит из трёх подсистем: регулятора Controller, задвижки Gate и резервуара Tank. На вход системе подаётся желаемый уровень жидкости  $h_d(t)$ , м с генератора сигналов Signal Builder. Вся система охвачена отрицательной обратной связью по уровню жидкости в резервуаре  $h(t)$ , м; этот же сигнал является выходом системы.

Регулятор Controller представляет собой нечёткий регулятор Fuzzy Logic Controller. На вход ему подаются ошибка по уровню жидкости  $e_h(t)$ , м и скорость изменения уровня жидкости  $\dot{h}(t)$ , м/с. Ошибка получается путём вычитания на сумматоре Sum 1 из желаемого уровня жидкости текущего, скорость является производной Derivative от текущего уровня жидкости. Оба сигнала объединяются в вектор на мультиплексоре Mux 1.

Выходом регулятора является угловая скорость задвижки  $\omega(t)$ , рад/с. Угол поворота задвижки  $\varphi(t)$ , рад получается путём подачи скорости на интегратор Integrator 1, после чего он усиливается в  $K_{gate}$  раз на усилителе Gain 1, «превращаясь» в объёмный расход жидкости  $Q(t)$ , м<sup>3</sup>/с, которая поступает в резервуар. Таким образом коэффициент  $K_{gate}$ , м<sup>3</sup>/ (рад · с) связан с пропускной способностью канала задвижки (например, с площадью поперечного сечения), по которому жидкость поступает в резервуар.

Подсистема резервуара охвачена отрицательной обратной связью по объёмному расходу воды из резервуара, то есть по скорости изменения объёма воды в нём  $\dot{V}$ , м<sup>3</sup>/с. Путём вычитания на сумматоре Sum 2 из объёмного расхода на входе резервуара объёмного расхода на выходе получается изменение объёмного расхода  $\Delta Q(t)$ , м<sup>3</sup>/с. Путём ослабления этого сигнала на аттенюаторе Gain 2 в  $S_{\text{tank}}$  раз «получается» скорость изменения уровня жидкости  $\dot{h}(t)$ , м/с. Коэффициент  $S_{\text{tank}}$ , м<sup>2</sup> имеет смысл площади поверхности жидкости в резервуаре. Текущий уровень жидкости определяется путём интегрирования скорости на пороговом интеграторе, состоящем из интегратора Integrator 2 и звена насыщения Saturation.

Скорость вытекающей из резервуара жидкости  $v(t)$ , м/с определяется следствием из закона Бернулли — формулой Торричелли

$$p_0 + \rho gh = p_0 + \frac{\rho v^2}{2} \Rightarrow v(t) = \sqrt{2gh(t)}, \quad (4)$$

где  $p_0$  — атмосферное давление, Па;

$\rho$  — плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  — ускорение свободного падения, м<sup>2</sup>/с;  $g \approx 9,81$  м<sup>2</sup>/с.

Однако формула Торричелли справедлива для идеальной несжимаемой жидкости, истекающей из малого отверстия. Для реальной жидкости следует учитывать поправки, связанные с вязкостью и сжатием жидкости, а также геометрическими параметрами отверстия.

Объёмный расход вытекающей из резервуара жидкости «получается» путём усиления скорости вытекающей жидкости в  $K_{\text{flow}}$  на усилителе Gain 3. Коэффициент  $K_{\text{flow}}$ , м<sup>2</sup> связан с площадью поперечного сечения канала, по которому вытекает жидкость, и физическими параметрами жидкости.

Сигналы желаемого и текущего уровня жидкости объединяются в вектор на мультиплексоре Mux 2 и поступают на вход осциллографа Scope для визуализации работы системы.

Разработаем систему нечёткого вывода типа Мамдани для выполнения задачи нечёткого регулирования. Введём две входные переменные: ошибку по уровню жидкости  $e_h$  и скорость расхода жидкости  $\dot{h}$ . Ошибка будет лежать в диапазоне  $[-1; 1]$ , скорость — в диапазоне  $[-0,2; 0,2]$ . Для соответствующих входных переменных error и rate системы нечёткого вывода определим три терма: negative-big, zero и positive-big. На начальном этапе рассмотрим только треугольные функции принадлежности. Графики функций принадлежности входных переменных  $\mu(e_h)$  и  $\mu(\dot{h})$  представлены на рисунке 2.

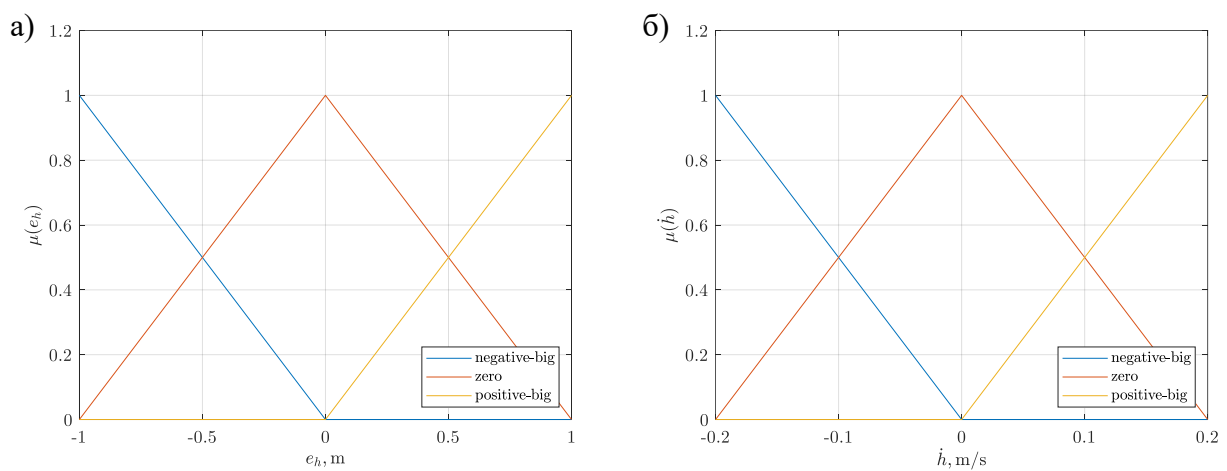


Рисунок 2 — Функции принадлежности термов входных переменных: а) —  $\mu(e_h)$ , б) —  $\mu(\dot{h})$

Введём также выходную переменную  $\omega$  — угловую скорость задвижки в диапазоне  $[-1,5; 1,5]$ . Для выходной переменной speed определим пять термов: negative-big, negative-middle, zero, positive-middle и positive-big. Графики функций принадлежности входной переменной  $\mu(\omega)$  представлены на рисунке 3.

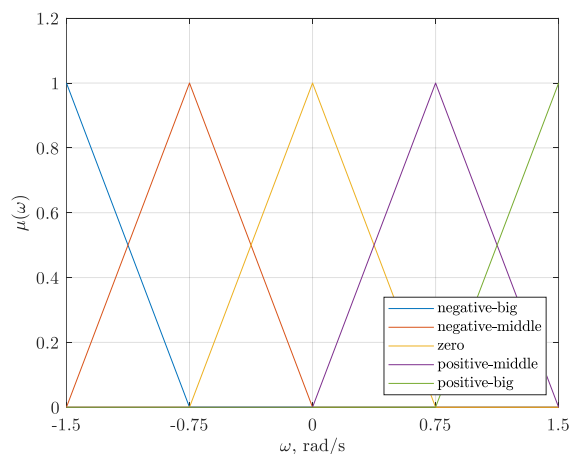


Рисунок 3 — Функции принадлежности термов выходной переменной  $\mu(\omega)$

Определим для системы нечёткого вывода следующую базу правил нечётких продукций:

- 1 Если  $\text{error} = \text{zero}$  и  $\text{rate} = \text{zero}$ , то  $\text{speed} = \text{zero}$ ;
- 2 Если  $\text{error} = \text{zero}$  и  $\text{rate} = \text{negative-big}$ , то  $\text{speed} = \text{positive-middle}$ ;
- 3 Если  $\text{error} = \text{zero}$  и  $\text{rate} = \text{positive-big}$ , то  $\text{speed} = \text{negative-middle}$ ;
- 4 Если  $\text{error} = \text{negative-big}$ , то  $\text{speed} = \text{negative-big}$ ;
- 5 Если  $\text{error} = \text{positive-big}$ , то  $\text{speed} = \text{positive-big}$ .

Поверхность «входы – выход» разработанной системы нечёткого вывода с треугольными функциями принадлежности термов входных и выходных переменных представлена на рисунке 4.

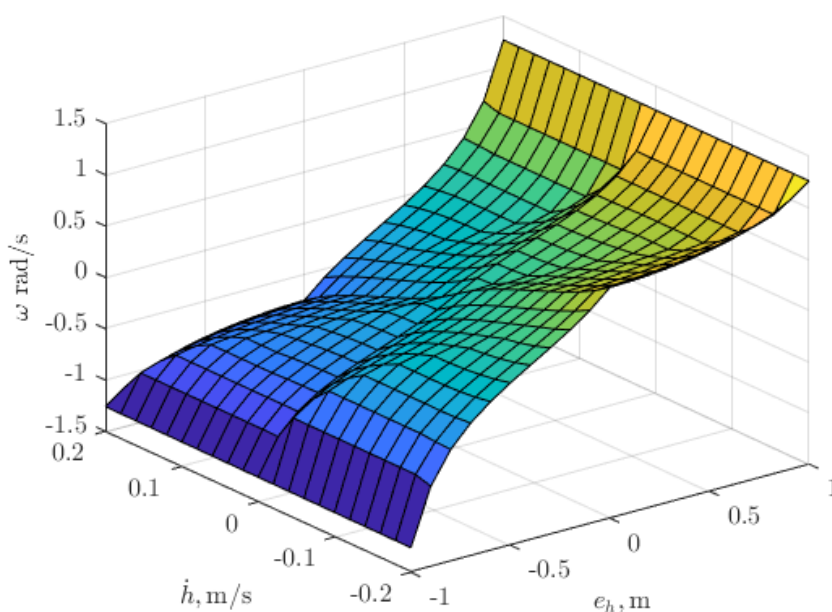


Рисунок 4 — Поверхность «входы – выход» нечёткого регулятора

Как видно по рисунку, полученная система адекватно решает поставленную задачу регулирования, закрывая задвижку при слишком высоком уровне жидкости (отрицательной ошибке) и открывает при слишком низком (положительной ошибке). Также она корректно открывает и закрывает задвижку при нулевой или малой ошибке, но ненулевой скорости изменения уровня жидкости, нейтрализуя вероятную нежелательную колебательность системы и нейтрализуя установившуюся составляющую ошибки.

График переходного процесса системы управления с нечётким регулятором представлен на рисунке 5.

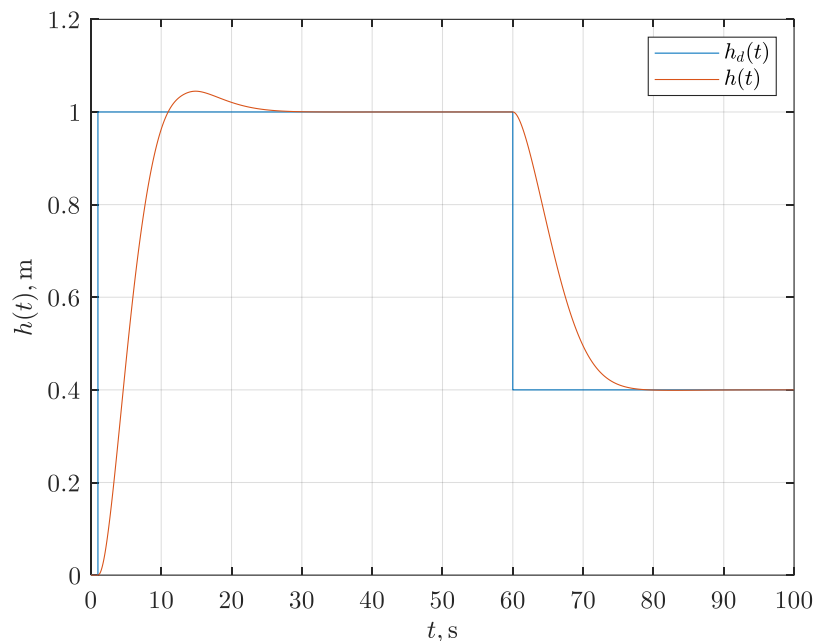


Рисунок 5 — График переходного процесса системы управления

Существует множество способов оценки качества переходного процесса. Наиболее часто рассматриваемыми являются показателями качества являются время переходного процесса  $t_{т.р.}$ , с, перерегулирование  $\sigma$ , установившаяся ошибка  $e_{h\text{ ст.}}$ , м и колебательность  $\kappa$ . Данная система обладает временем переходного процесса  $t_{т.р.} = 9,7$  с, перерегулированием  $\sigma = 4,5$  %, а статическая ошибка и колебательность отсутствуют:  $e_{h\text{ ст.}} = 0$ ,  $\kappa = 0$ . Несмотря на незначительное перерегулирование, система обладает достаточно высоким быстродействием, в ней отсутствуют негативные колебательные процессы и имеется астатизм первого порядка.

Исследуем робастность системы по отношению к изменению параметров объекта управления. Для этого осуществим варьирование площади поперечного сечения резервуара  $S_{\text{tank}}$ , коэффициента пропускной способности задвижки  $K_{\text{gate}}$  и коэффициента объёмного расхода вытекающей из резервуара воды  $K_{\text{flow}}$  в пределах  $\pm 20$  % и  $\pm 60$  %.



Поскольку экспериментально было установлено, что одновременное приращение значений всех параметров не оказывает почти никакого эффекта на переходные процессы в системе, было решено варьировать значения параметров объекта управления по отдельности. Графики переходных процессов системы управления с различными значениями параметров объекта управления представлены на рисунке 6.

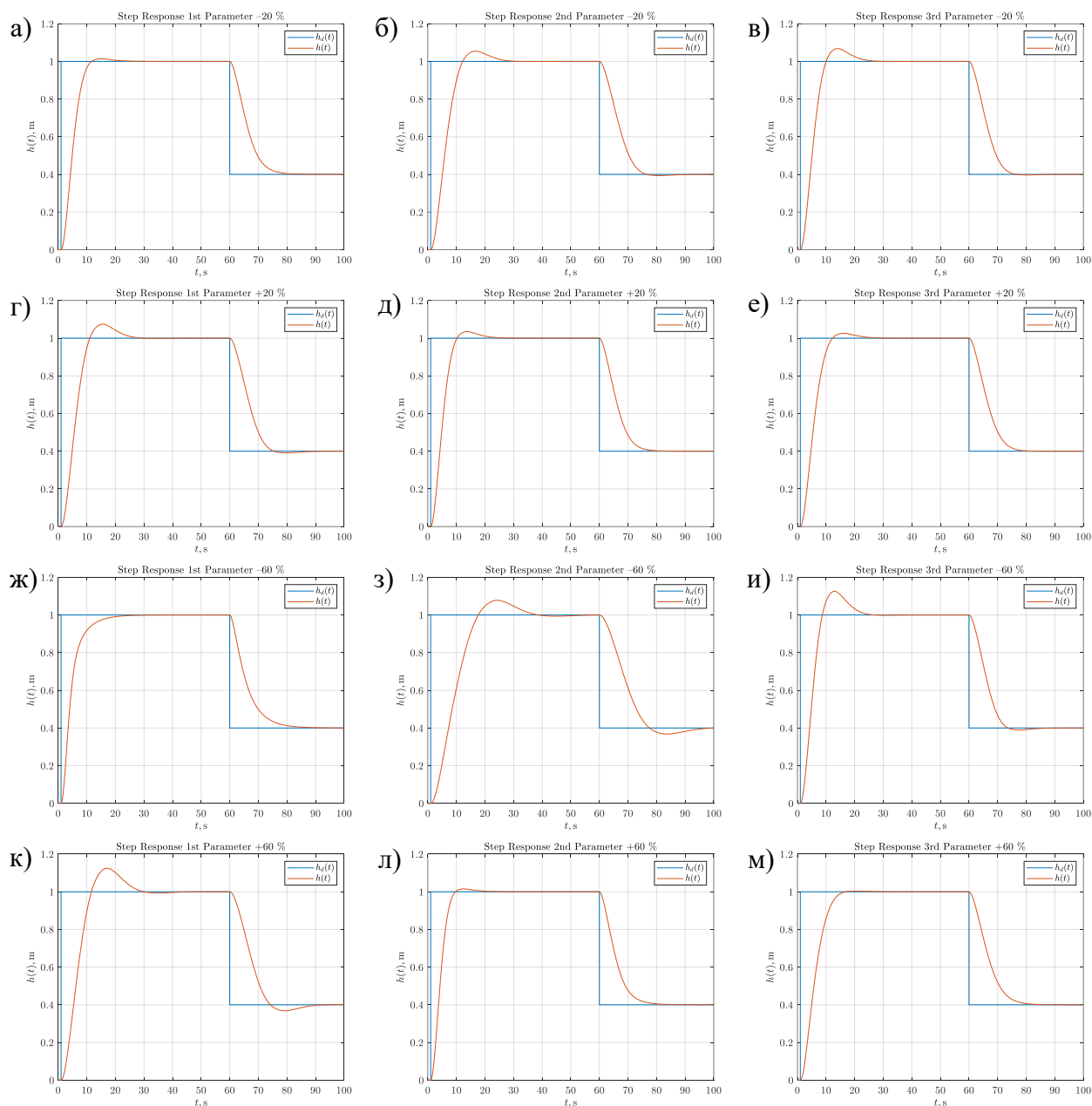


Рисунок 6 — Графики переходных процессов в системах управления с изменёнными значениями параметров объектов управления:  
а), б), в) — с уменьшенными на 20 % значениями параметрами  $S_{\text{tank}}$ ,  $K_{\text{gate}}$ ,  $K_{\text{flow}}$ ,  
г), д), е) — с увеличенными на 20 % значениями параметрами  $S_{\text{tank}}$ ,  $K_{\text{gate}}$ ,  $K_{\text{flow}}$ ,  
ж), з), и) — с уменьшенными на 60 % значениями параметрами  $S_{\text{tank}}$ ,  $K_{\text{gate}}$ ,  $K_{\text{flow}}$ ,  
к), л), м) — с увеличенными на 60 % значениями параметрами  $S_{\text{tank}}$ ,  $K_{\text{gate}}$ ,  $K_{\text{flow}}$

По полученным графикам переходных процессов оценим их качество. Результаты оценки качества переходных процессов представлены в таблице 1.

Таблица 1 — Результаты оценки качества переходных процессов в системах управления с изменёнными значениями параметров объекта управления

Параметр объекта управления	Изменение значения параметра	Время переходного процесса $t_{\text{п.}}$ , с	Перерегулирование $\sigma$	Установившаяся ошибка $e_{\text{ст.}}$ , М	Колебательность к
$S_{\text{tank}}$	–20 %	9,6	1,4 %	0	0
$K_{\text{gate}}$		18,2	5,5 %	0	0
$K_{\text{flow}}$		17,0	6,8 %	0	0
$S_{\text{tank}}$	+20 %	19,2	7,4 %	0	0
$K_{\text{gate}}$		8,9	3,5 %	0	0
$K_{\text{flow}}$		10,5	2,6 %	0	0
$S_{\text{tank}}$	–60 %	12,2	0 %	0	0
$K_{\text{gate}}$		29,6	7,8 %	0	0
$K_{\text{flow}}$		18,6	12,6 %	0	0
$S_{\text{tank}}$	+60 %	23,1	12,5 %	0	0
$K_{\text{gate}}$		8,0	1,5 %	0	0
$K_{\text{flow}}$		12,5	1,0 %	0	0

Как видно из результатов сравнения, изменение значений параметров объекта управления приводит и к изменению показателей качества, причём как в лучшую, так и в худшую сторону. При существенном увеличении величины перерегулирования (более 5 %) растёт и время переходного процесса.

Несмотря на достаточно большой разброс в значениях времени переходного процесса и перерегулирования, ни в одном из случаев система не потеряла устойчивость, в ней не появились колебания и не увеличилась установившаяся ошибка.

Исследуем влияние типа функции принадлежности на характер поверхности «входы – выход» и переходный процесс системы управления. Для этого анализируем различные комбинации типов функций принадлежности, добавив к рассмотрению гауссовы функции принадлежности. Сравнение функций принадлежности термов входных и выходных переменных представлено на рисунке 7

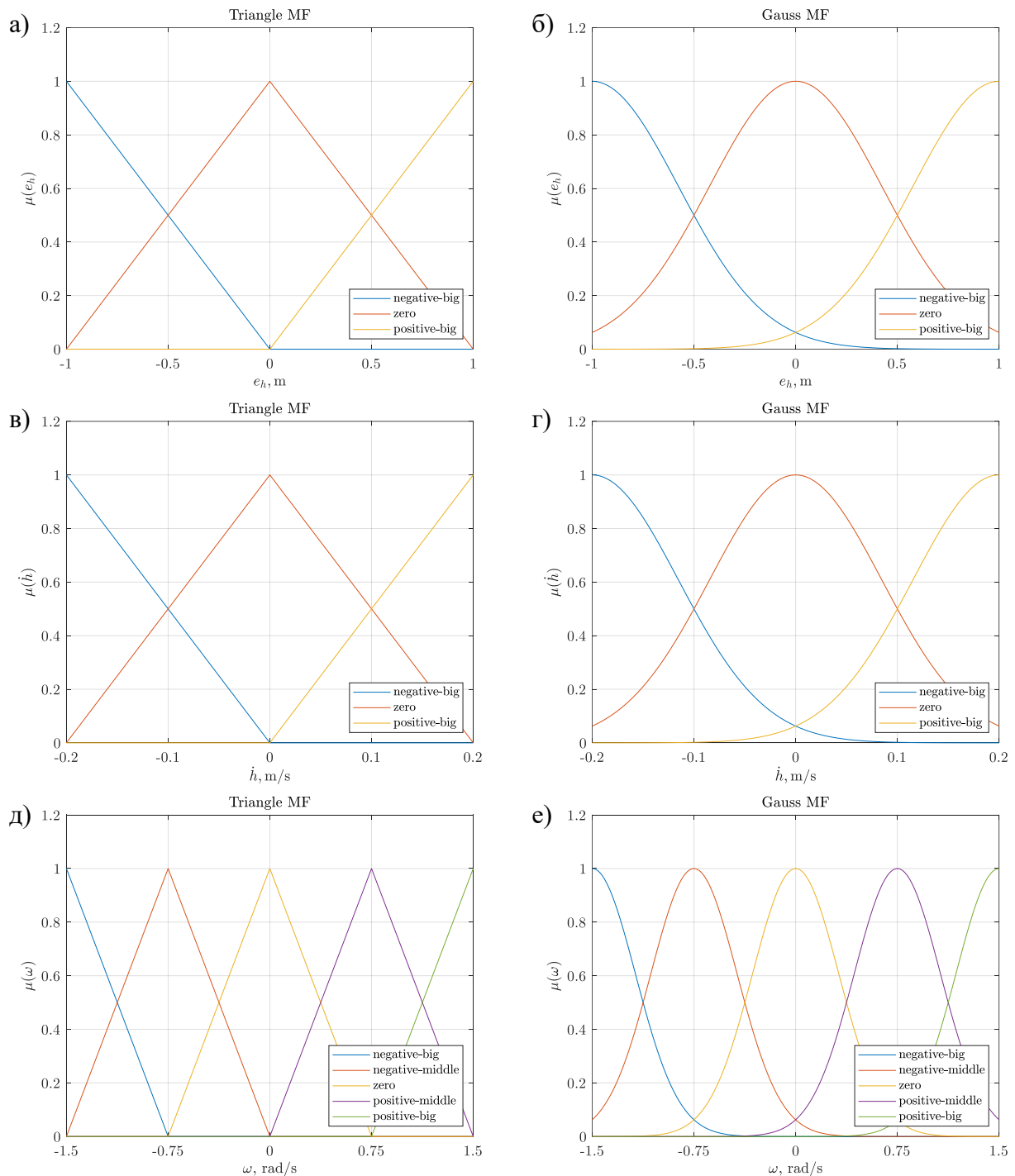


Рисунок 7 — Функции принадлежности термов входных и выходных переменных:

- а) —  $\mu(e_h)$  с треугольными функциями, б) —  $\mu(e_h)$  с гауссовыми функциями,  
 в) —  $\mu(\dot{h})$  с треугольными функциями, г) —  $\mu(\dot{h})$  с гауссовыми функциями,  
 д) —  $\mu(\omega)$  с треугольными функциями, е) —  $\mu(\omega)$  с гауссовыми функциями

Сравнение поверхностей «входы – выход» нечётких регуляторов с различными типами функций принадлежности входных и выходных переменных представлено на рисунке 8.

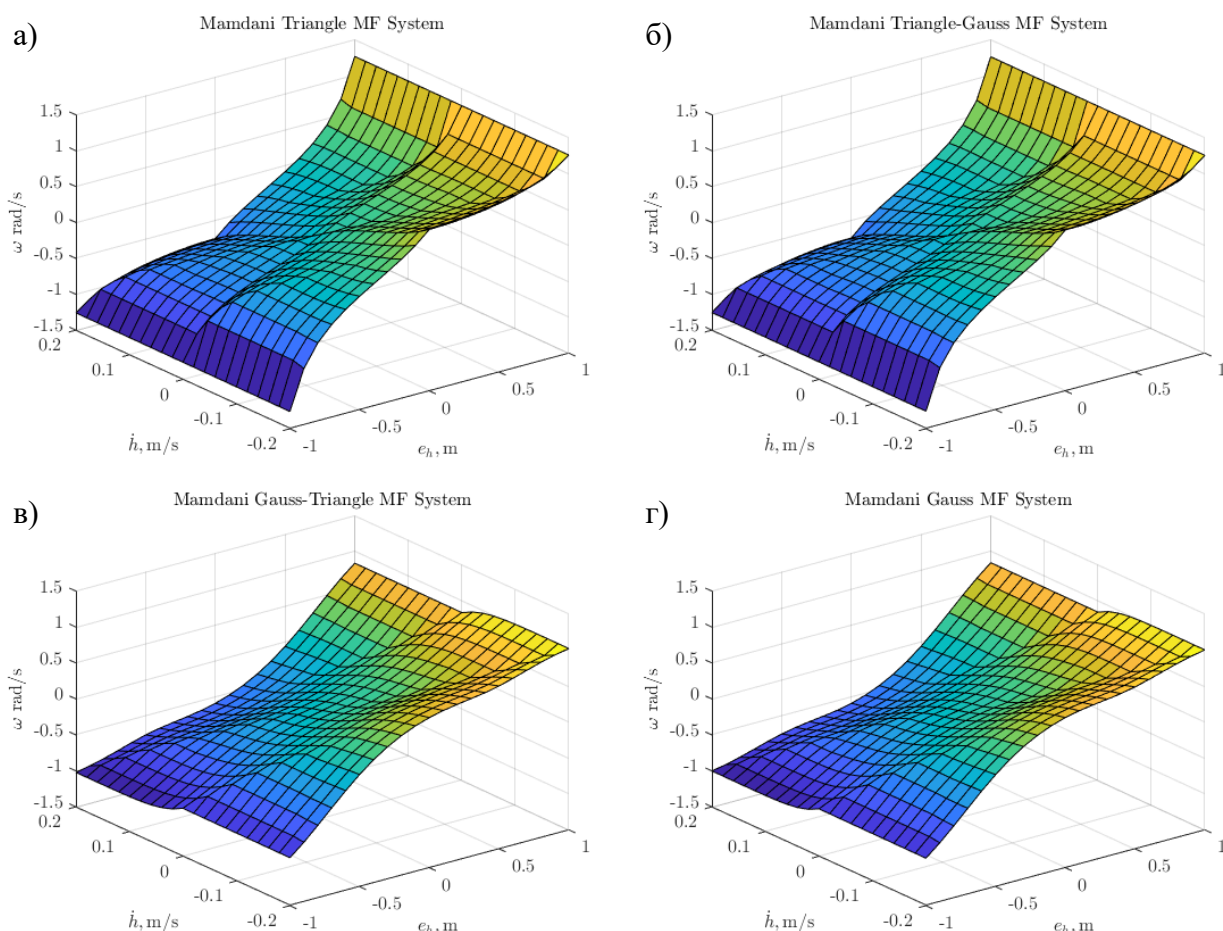


Рисунок 8 — Поверхности «входы – выход» нечётких регуляторов с различными типами функций принадлежности термов входных и выходных переменных: а) — с треугольными функциями на входах и на выходе, б) — с треугольными функциями на входах и гауссовыми функциями на выходе, в) — с гауссовыми функциями на входах и треугольными функциями на выходе, г) — с гауссовыми функциями на входах и на выходе

Как можно видеть, тип функции на выходе слабо влияет на характер поверхности «входы – выход» нечёткого регулятора. Влияние типа функции на входе оказывает заметно большее влияния, уменьшая крутизну наклона поверхности.

Графики переходных процессов системы управления с различными типами функций принадлежности термов входных и выходных представлены на рисунке 9. По полученным графикам переходных процессов оценим их качество. Результаты оценки качества переходных процессов представлены в таблице 2.

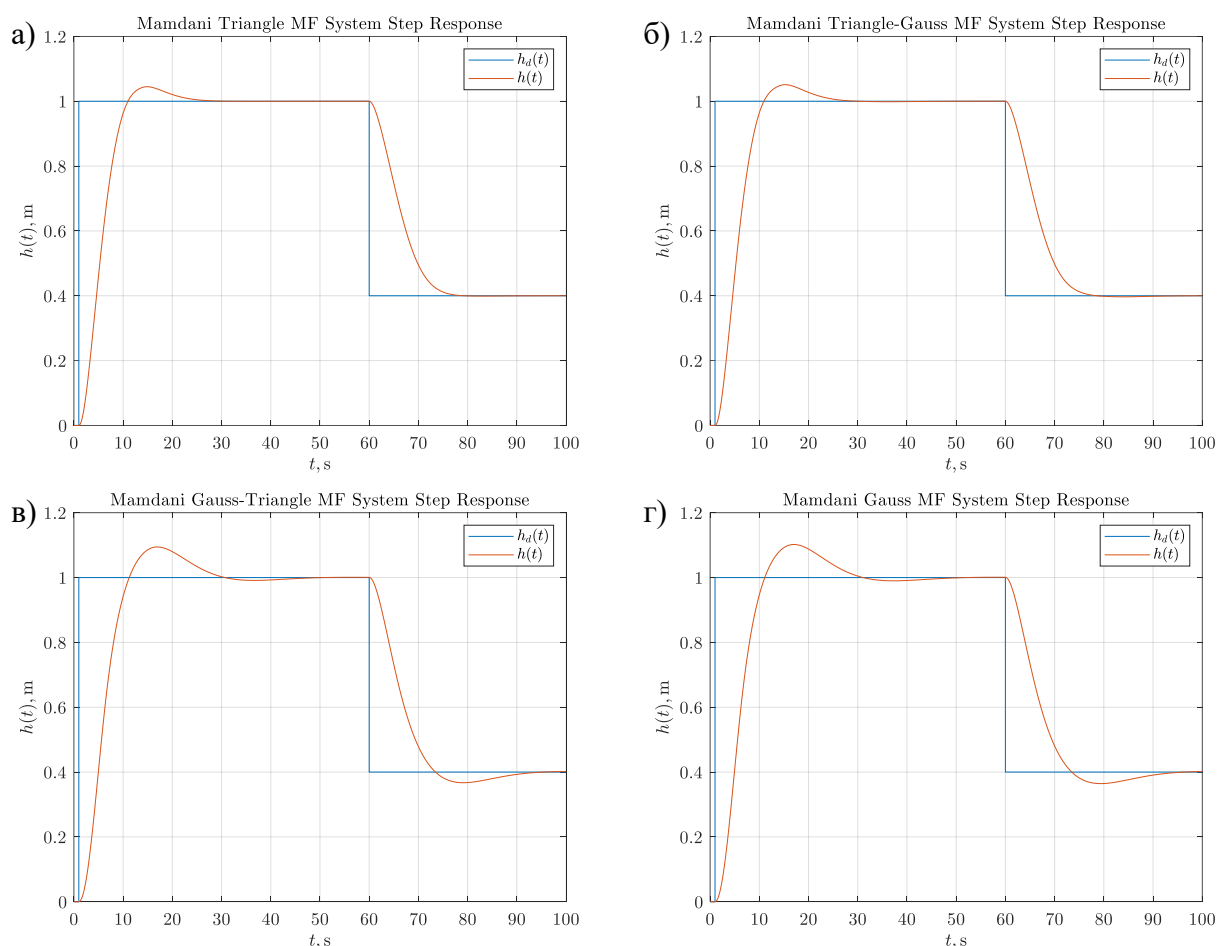


Рисунок 9 — Графики переходных процессов систем управления с различными типами функций принадлежности термов входных и выходных переменных нечёткого регулятора: а) — с треугольными функциями на входах и на выходе, б) — с треугольными функциями на входах и гауссовыми функциями на выходе, в) — с гауссовыми функциями на входах и треугольными функциями на выходе, г) — с гауссовыми функциями на входах и на выходе

Таблица 2 — Результаты оценки качества переходных процессов в системах управления с различными типами функций принадлежности термов входных и выходных переменных

Тип функции на входе	Тип функции на выходе	Время переходного процесса $t_{\text{т.р.}}$ , с	Перерегулирование $\sigma$	Установившаяся ошибка $e_{h \text{ ст.}}$ , м	Колебательность $\kappa$
треугольная	треугольная	9,7	4,5 %	0	0
треугольная	гауссова	16,0	5,1 %	0	0
гауссова	треугольная	23,2	9,4 %	0	0
гауссова	гауссова	23,9	10,2 %	0	0

Как видно из результатов сравнения, лучше всего себя показала исходная система с треугольными функциями как на входе, так и на выходе. Изменение типа выходной функции с треугольной на гауссову незначительно увеличивает перерегулирование и время переходного процесса, а аналогичное изменение типа входной функции значительно ухудшает качество переходных процессов.

Эксперименты показали, что ни изменение параметров функций принадлежности входных и выходных переменных, ни изменение весовых коэффициентов правил нечётких продукций также не позволяют улучшить качество переходных процессов.

Блок-схема системы управления из демонстрационного примера «Simulate Fuzzy Inference System» представлена на рисунке 10.

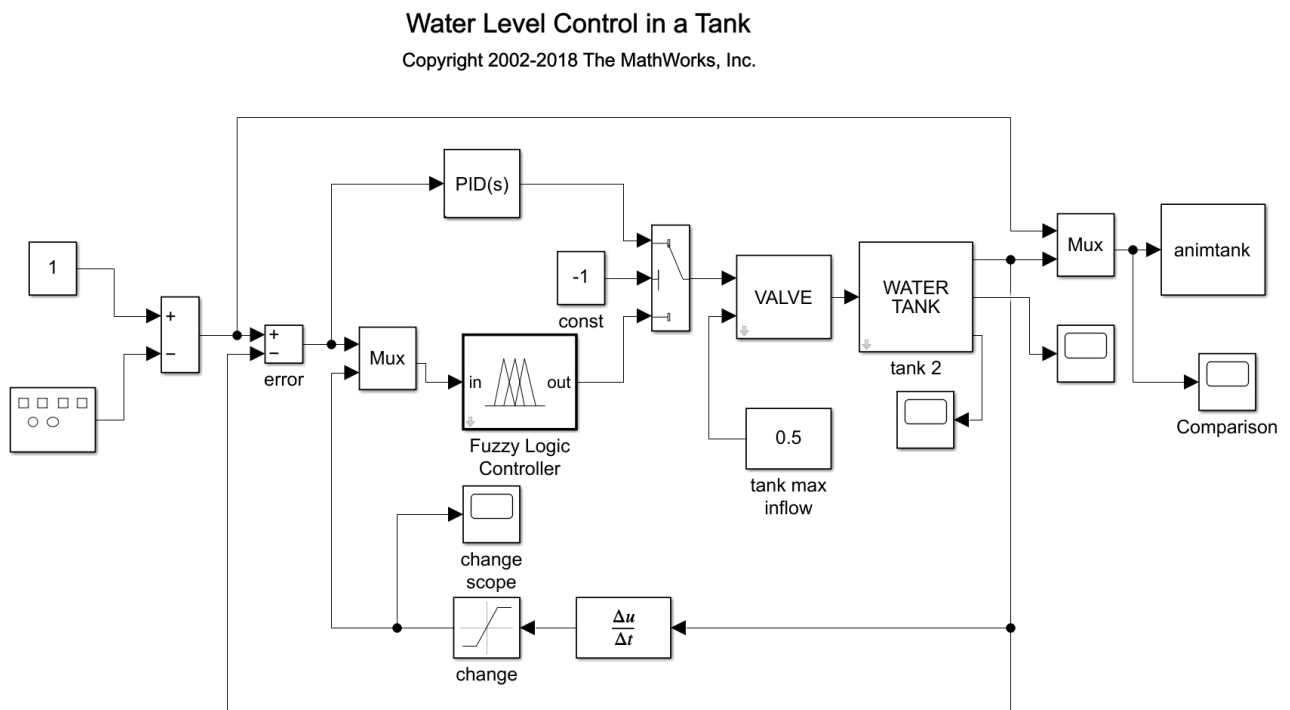


Рисунок 10 — Блок-схема системы управления

Объектом управления является резервуар с жидкостью Water Tank, устройством управления — вентиль Valve, а гибридный регулятор состоит из ПИД-регулятора PID Controller и нечёткого регулятора Fuzzy Logic Controller.

На вход системы подаётся задающий сигнал в виде желаемого уровня жидкости в резервуаре, представляющего собой комбинацию двух сигналов: сигнала постоянного уровня Constant 1 с значением  $h_0 = 1$  м и прямоугольного сигнала генератора сигналов Signal Generator с амплитудой  $\Delta h = 0,5$  м и циклической частотой  $\omega = 2\pi f = 0,1$  рад/с (частота следования прямоугольных сигналов  $f = 0,016$  Гц). Второй сигнал вычитается из первого на сумматоре Sum 1.

Выходом системы является текущий уровень жидкости в резервуаре  $h$ , м. Система охвачена отрицательной обратной связью уровнем жидкости и по

скорости его изменения  $\dot{h}$ , м/с; скорость которая может изменяться в диапазоне от  $-0,1$  до  $+0,1$  м/с. Вычисление скорости производится при помощи производной Derivative, а её ограничение — с помощью звена насыщения Saturation 1. Текущее значение уровня жидкости вычитается из желаемого на сумматоре Sum 2, давая значение ошибки регулирования  $e_h$ , м.

Сигналы с текущими ошибкой по уровню жидкости и скоростью изменения уровня подаются на вход гибридного регулятора: на вход ПИД-регулятора подаётся только ошибка регулирования, а на вход нечёткого регулятора — вектор из ошибки и скорости, полученный путём объединения сигналов с помощью мультиплексора Mux 1. Выходы регуляторов выдают сигнал со значением обобщённой скорости поворота вентиля  $\dot{\psi}$ , рад/с

Выходы регуляторов соединены со входами переключателя Switch. То, какой вход переключателя соединяется с его выходом (а значит, с объектом и устройством управления), определяется уровнем сигнала на его управляющем входе. На данный вход может быть подан один из сигналов обратной связи, например, текущая ошибка регулирования для адаптивной подстройки гибридного регулятора под текущее состояние системы. Однако в данном примере на управляющий вход подаётся сигнал постоянного уровня Constant 2 величиной  $-1$ , а потому выход переключателя всё время соединён со вторым входом. Таким образом активным остаётся лишь нечёткий регулятор на протяжении всего процесса моделирования.

Подсистема вентиля показана на рисунке 11. Она имеет два входа и один выход. На первый вход Control подаётся обобщённая скорость поворота вентиля, которая интегрируется на пороговом интеграторе Limited Integrator, давая значение степени открытия вентиля  $\psi$  в диапазоне от 0 до 1. На второй вход Flow In подаётся сигнал постоянного уровня Constant 3 с максимальным объёмным расходом поступающей в резервуар жидкости  $Q_{\max} = 0,5 \text{ м}^3/\text{с}$ . Перемножение этих значений на умножителе Product даёт значение объёмного расхода  $Q$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$  поступающей на выход Flow Out жидкости.

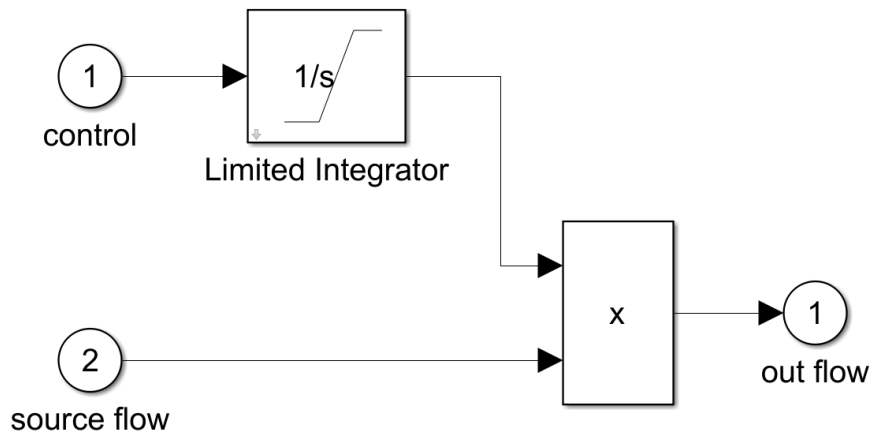


Рисунок 11 — Блок-схема подсистемы вентиля

Подсистема резервуара с жидкостью показан на рисунке 12. Она имеет единственный вход и три выхода. На вход системе подаётся значение объёмного расхода поступающей с вентиля жидкости. Из данного сигнала на сумматоре Sum вычитается сигнал, соответствующий значению объёмного расхода  $\dot{V}$ , м<sup>3</sup>/с вытекающей жидкости; этот же сигнал подаётся на выход Flow Out.

В результате вычитания получается скорость изменения объёма жидкости в резервуаре. Путём интегрирования этого сигнала на пороговом интеграторе Integrator вычисляется текущий объём жидкости в резервуаре, а путём его деления на площадь на аттенюаторе Gain 1 — текущий уровень жидкости в резервуаре. Этот сигнал поступает на выход Water Level.

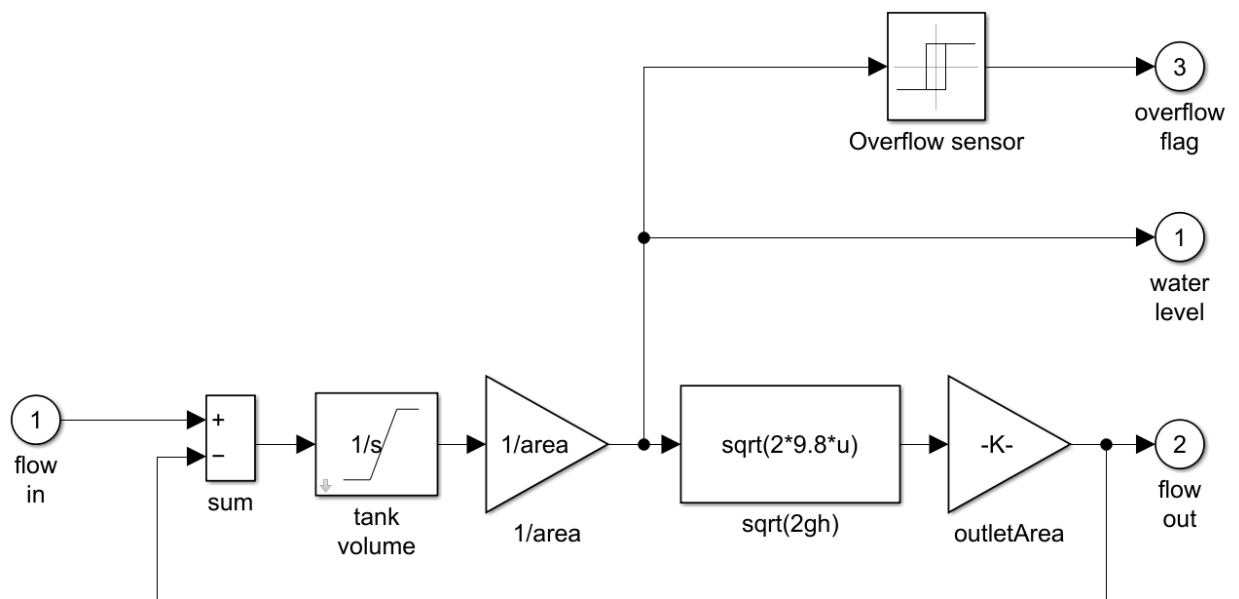


Рисунок 12 — Блок-схема подсистемы резервуара



Также сигнал уровня жидкости подаётся на реле Relay (которое подозрительно похоже на триггер Шмитта), образующее датчик переполнения резервуара. Сигнал с датчика подаётся на выход Overflow Flag.

Путём вычисления по формуле Торричелли на блоке Function определяется значение сигнала скорости потока истекающей жидкости  $v$ , м/с, а за счёт его умножения на площадь выходного отверстия на усилителе Gain 2 — значение сигнала объёмного расхода вытекающей из резервуара жидкости.

Сигналы скорости изменения уровня жидкости, объёмного расхода вытекающей из резервуара жидкости и датчика переполнения резервуара подаются на осциллографы Score 1, Score 2 и Score 3. Желаемый и текущий уровни жидкости объединяются в вектор на мультиплексоре Mux 2 и подаются на осциллограф Score 4 и блок S-Function, который анимирует уровень жидкости в резервуаре. Всё это позволяет производить мониторинг состояния системы во время моделирования в целях отладки.

Таким образом, можно заключить, что подсистемы системы управления из примера «Simulate Fuzzy Inference System» во многом схожи с аналогичными из исследуемой в данной работе системы, а значит, их можно считать эквивалентными.

## **Вывод**

Системы нечёткого вывода могут успешно применяться в качестве регуляторов систем с обратными связями. При этом, благодаря способности нечётких систем к обобщению, могут быть достигнуты весьма высокие показатели качества переходных процессов в системе и робастность к изменению параметров объекта управления.

23:50

03 ноября 2022 г.