

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.

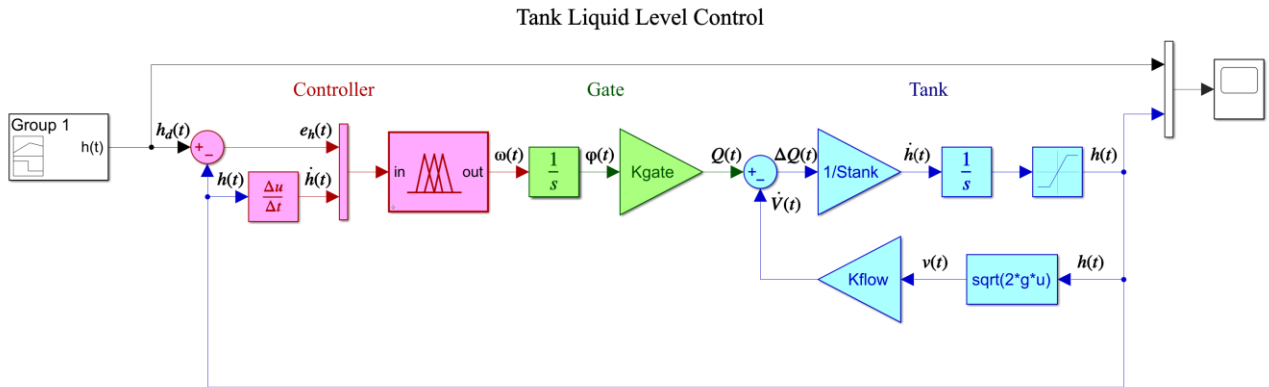


Рисунок 1 — Блок-схема системы управления

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 $Q(t)$, м³/с, которая поступает в резервуар. Таким образом коэффициент K_{gate} , м³/ (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} , м³/с. Путём вычитания на сумматоре Sum 2 из объёмного расхода на входе резервуара объёмного расхода на выходе получается изменение объёмного расхода $\Delta Q(t)$, м³/с. Путём ослабления этого сигнала на аттенюаторе Gain 2 в S_{tank} раз «получается» скорость изменения уровня жидкости $\dot{h}(t)$, м/с. Коэффициент S_{tank} , м² 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;

ρ — плотность жидкости, кг/м³;

g — ускорение свободного падения, м²/с; $g \approx 9,81$ м²/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_{flow} на усилителе Gain 3. Коэффициент K_{flow} , м² 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.

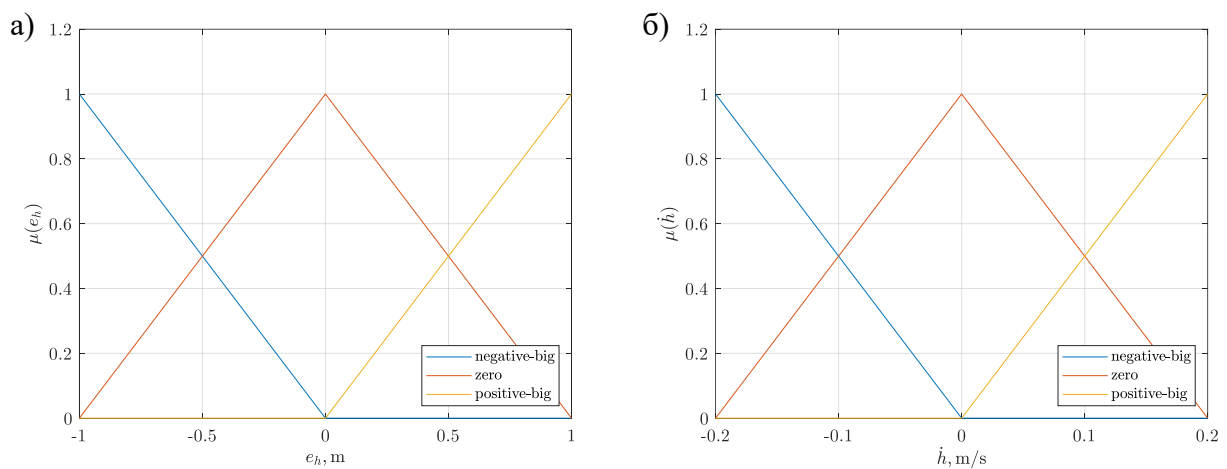


Рисунок 2 — Функции принадлежности термов входных переменных: а) — $\mu(e_h)$, б) — $\mu(\dot{h})$

Введём также выходную переменную ω — угловая 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.

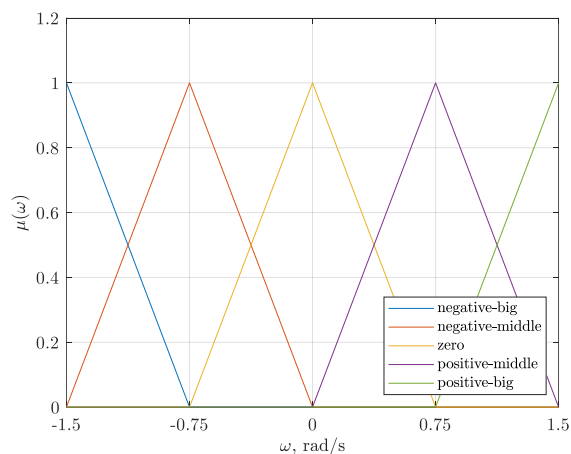


Рисунок 3 — Функции принадлежности термов выходной переменной $\mu(\omega)$

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.

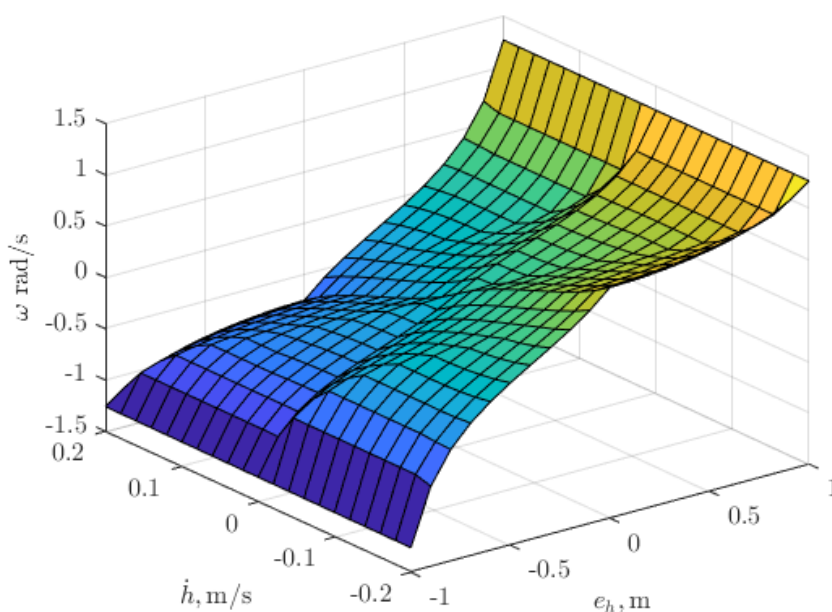


Рисунок 4 — Поверхность «входы – выход» нечёткого регулятора

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

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

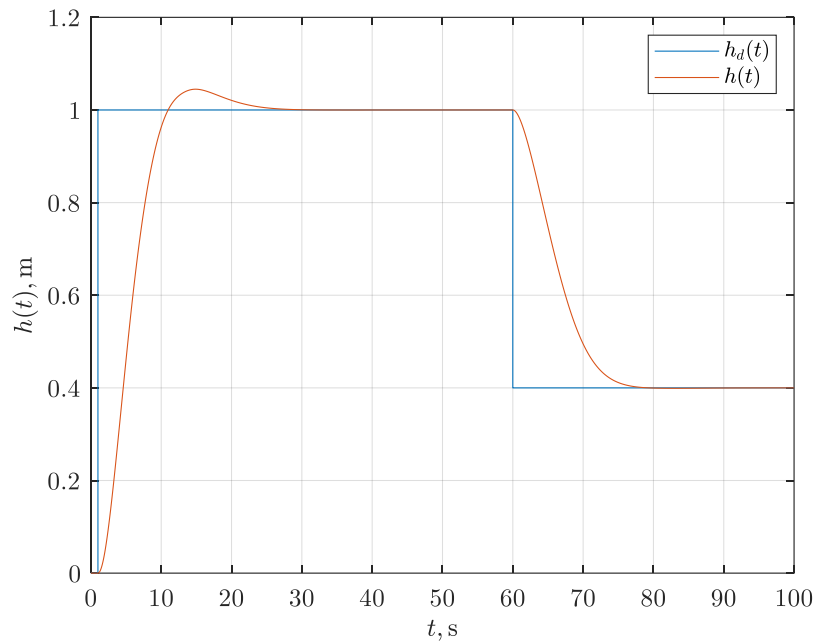


Рисунок 5 — График переходного процесса системы управления

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

Исследуем робастность системы к изменению параметров объекта управления. Для этого осуществим варьирование коэффициента пропускной способности задвижки K_{gate} , площади поперечного сечения резервуара S_{tank} и коэффициента объёмного расхода вытекающей из резервуара воды K_{flow} в пределах ± 20 % и ± 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 одному. Графики переходных процессов системы управления с различными значениями параметров объекта управления представлены на рисунке 6.

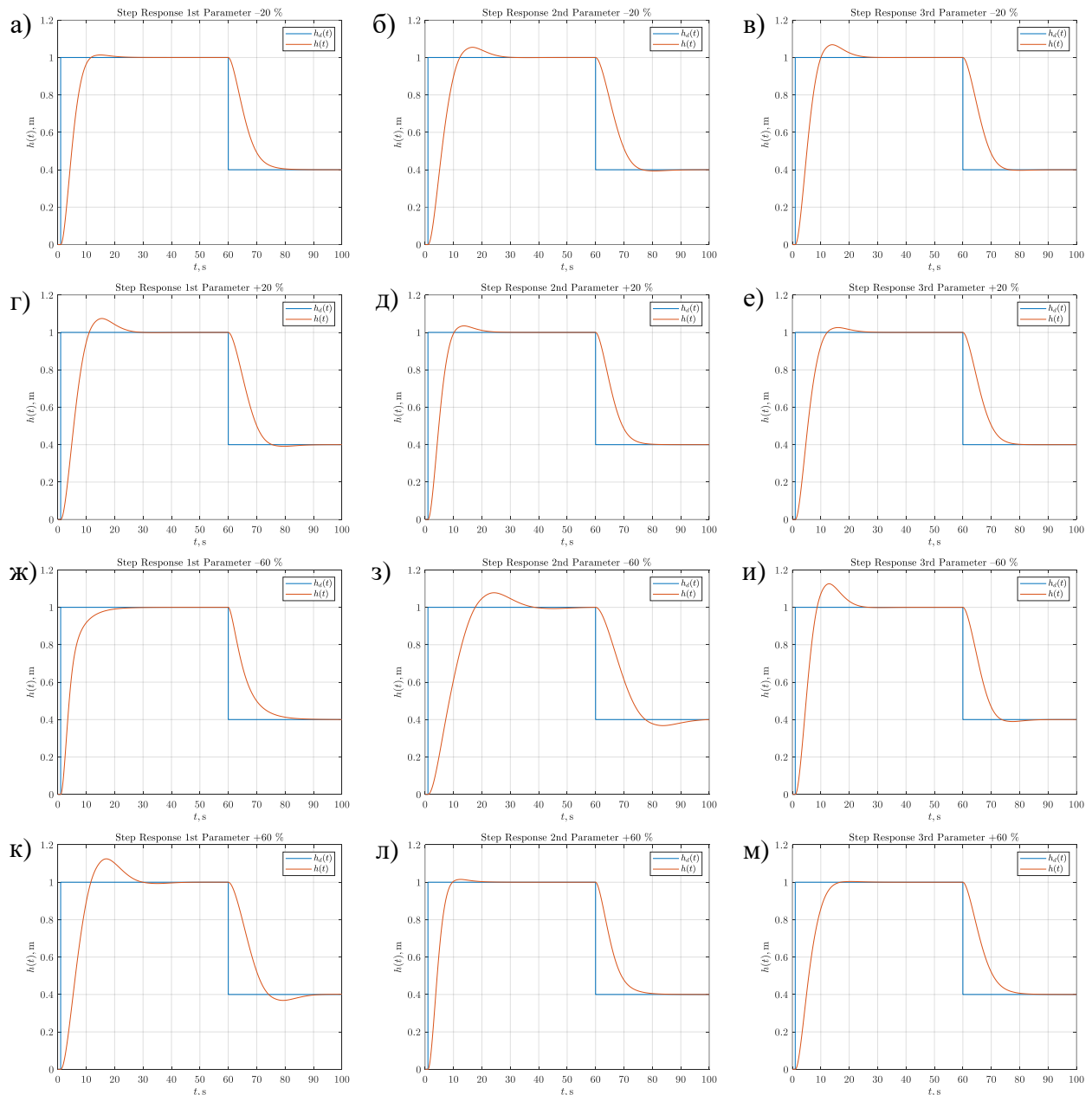


Рисунок 6 — Графики переходных процессов в системах управления с изменёнными параметрами объектов управления:
а), б), в) — с уменьшенными на 20 % параметрами S_{tank} , K_{gate} , K_{flow} ,
г), д), е) — с увеличенными на 20 % параметрами S_{tank} , K_{gate} , K_{flow} ,
ж), з), и) — с уменьшенными на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

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

Как видно из результатов сравнения, изменение параметров приводит и к изменению показателей качества, причём как в лучшую, так и в худшую сторону. При увеличении величины перерегулирования растёт и время переходного процесса. Несмотря на достаточно большой разброс времени переходного процесса и перерегулирования, система не потеряла устойчивость, в ней не появились колебания и не увеличилась установившаяся ошибка.

Исследуем влияние типа функции принадлежности на характер поверхности «входы – выход» на систему нечёткого вывода. Для этого проанализируем различные комбинации типов функций принадлежности, добавив к рассмотрению гауссовы функции принадлежности. Сравнение функций принадлежности термов входных и выходных переменных представлено на рисунке

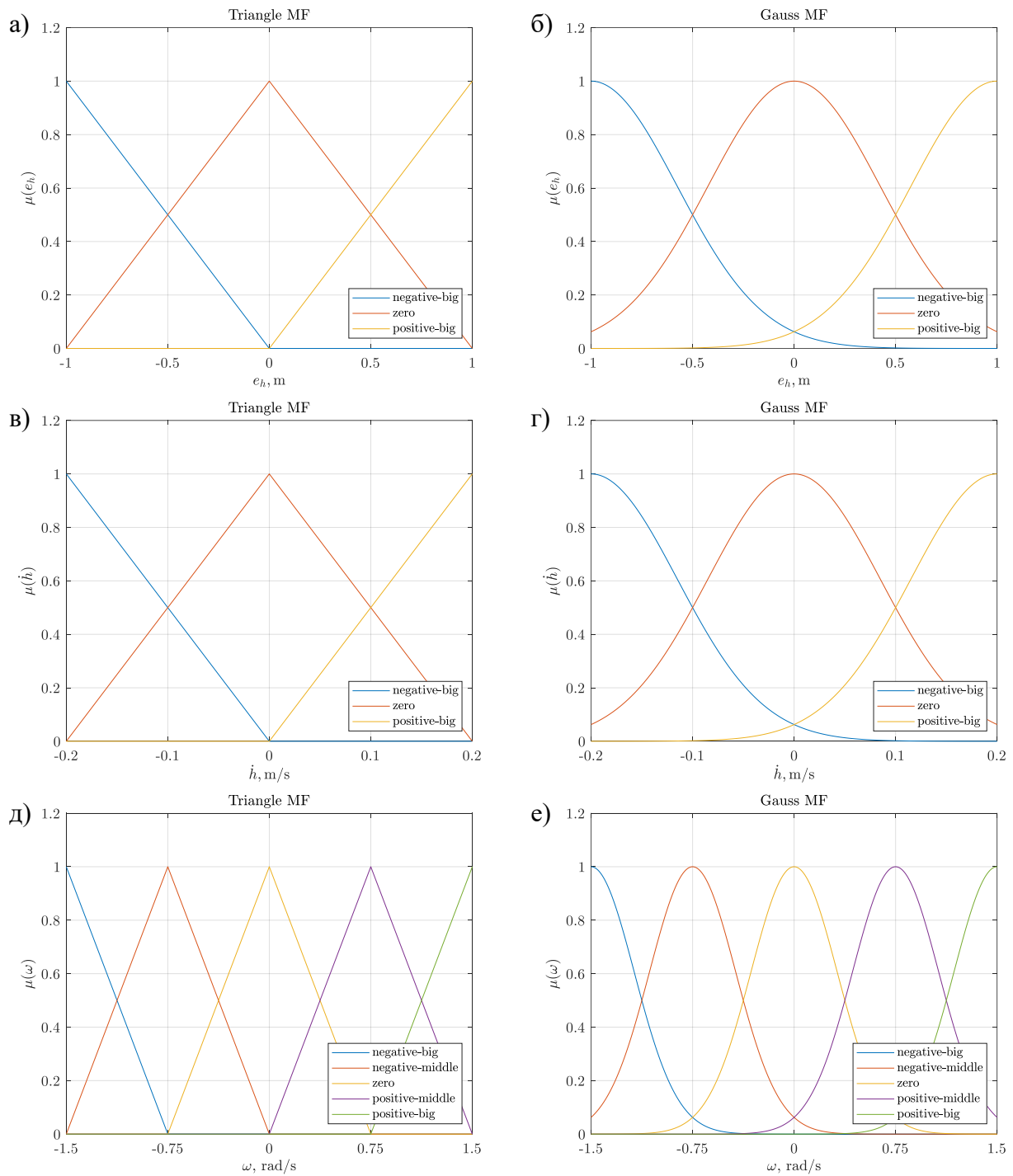


Рисунок 7— Функции принадлежности термов входных и выходных переменных:

- 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.

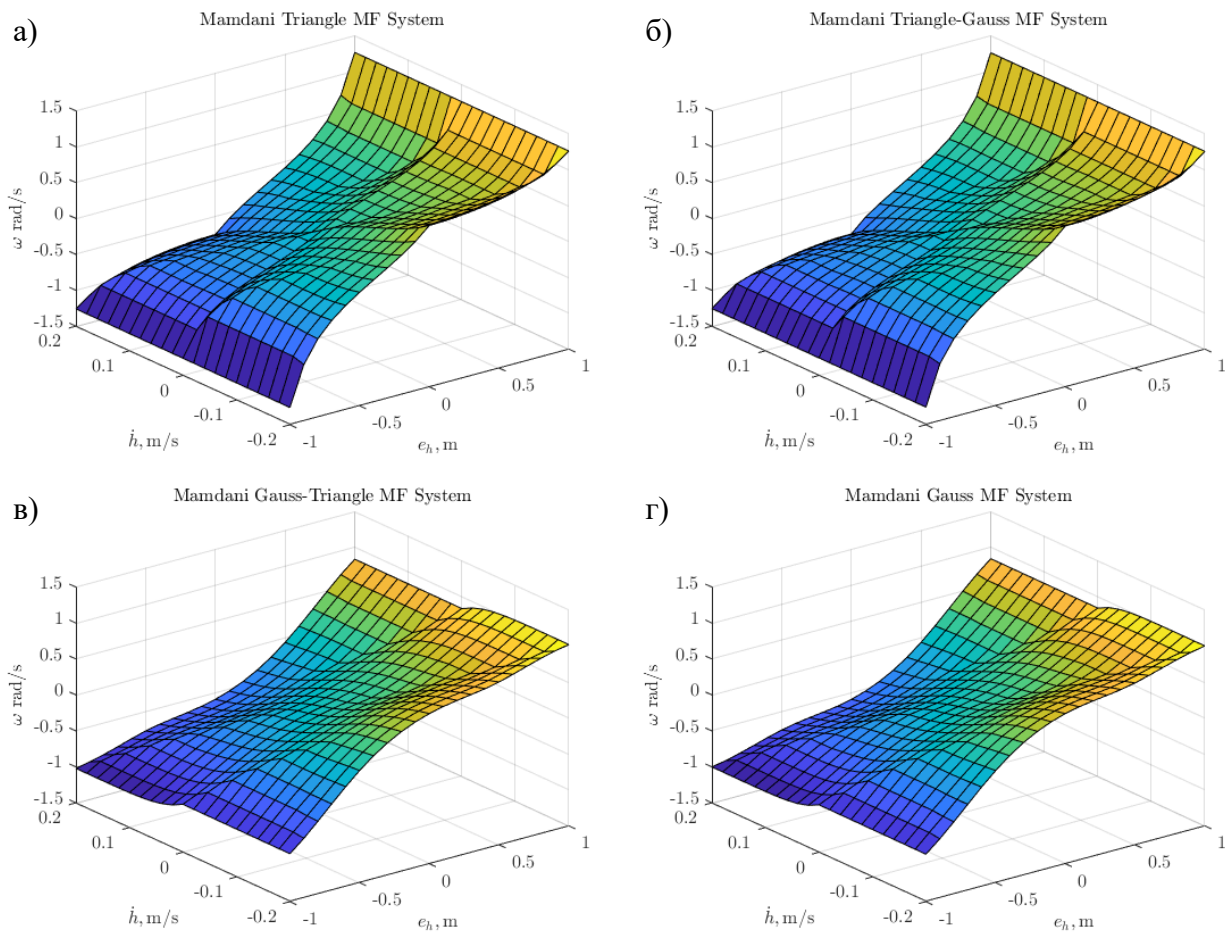


Рисунок 8 — Поверхности «входы – выход» нечётких регуляторов с различными типами функций принадлежности термов входных и выходных переменных: а) — с треугольными функциями на входах и на выходе, б) — с треугольными функциями на входах и гауссовыми функциями на выходе, в) — с гауссовыми функциями на входах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

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.

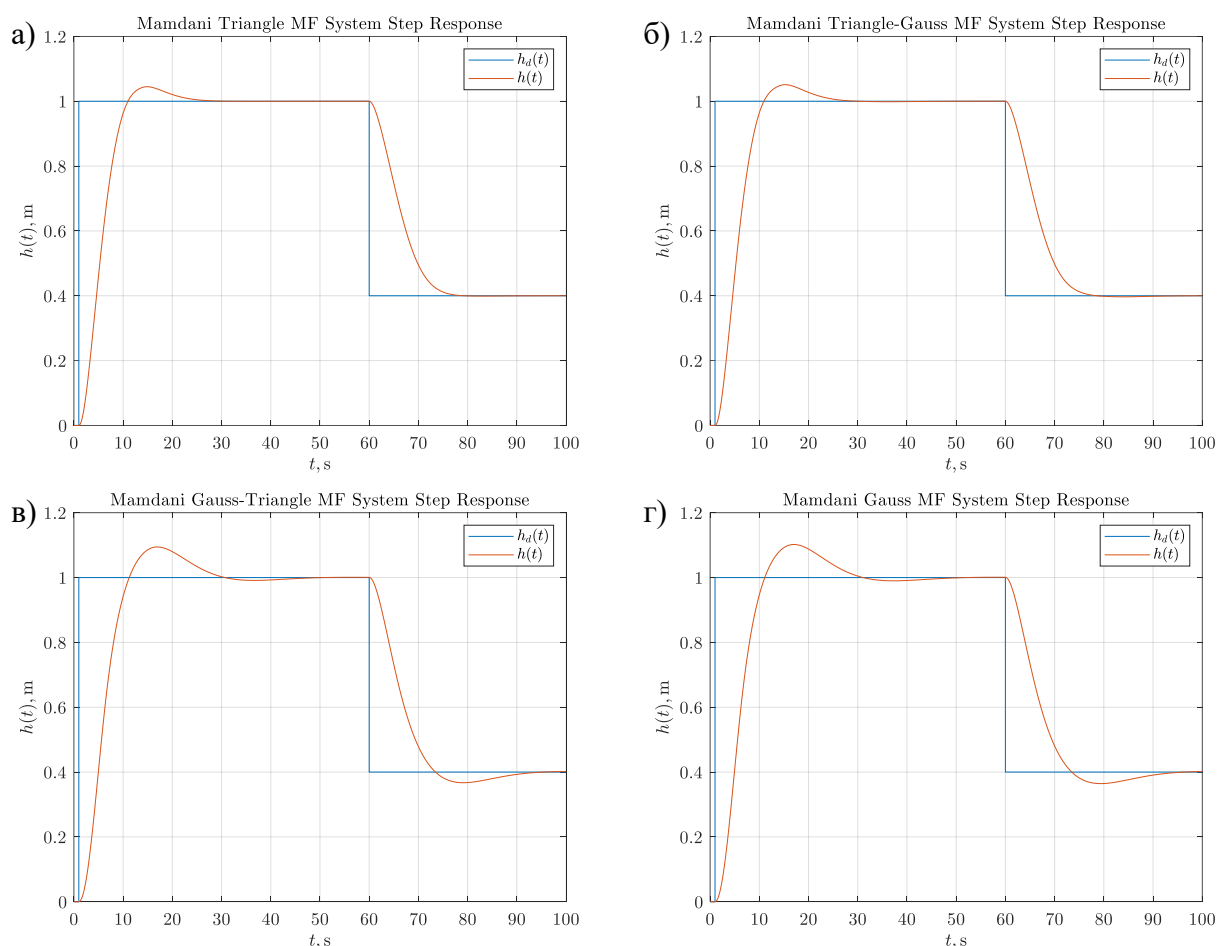


Рисунок 9 — Графики переходных процессов систем управления с различными типами функций принадлежности термов входных и выходных переменных: а) — с треугольными функциями на входах и на выходе, б) — с треугольными функциями на входах и гауссовыми функциями на выходе, в) — с гауссовыми функциями на входах 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 $t_{\text{п.}}$, с	Перерегулирование σ	Установившаяся ошибка $e_{\text{h st.}}$, м	Колебательность к
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.

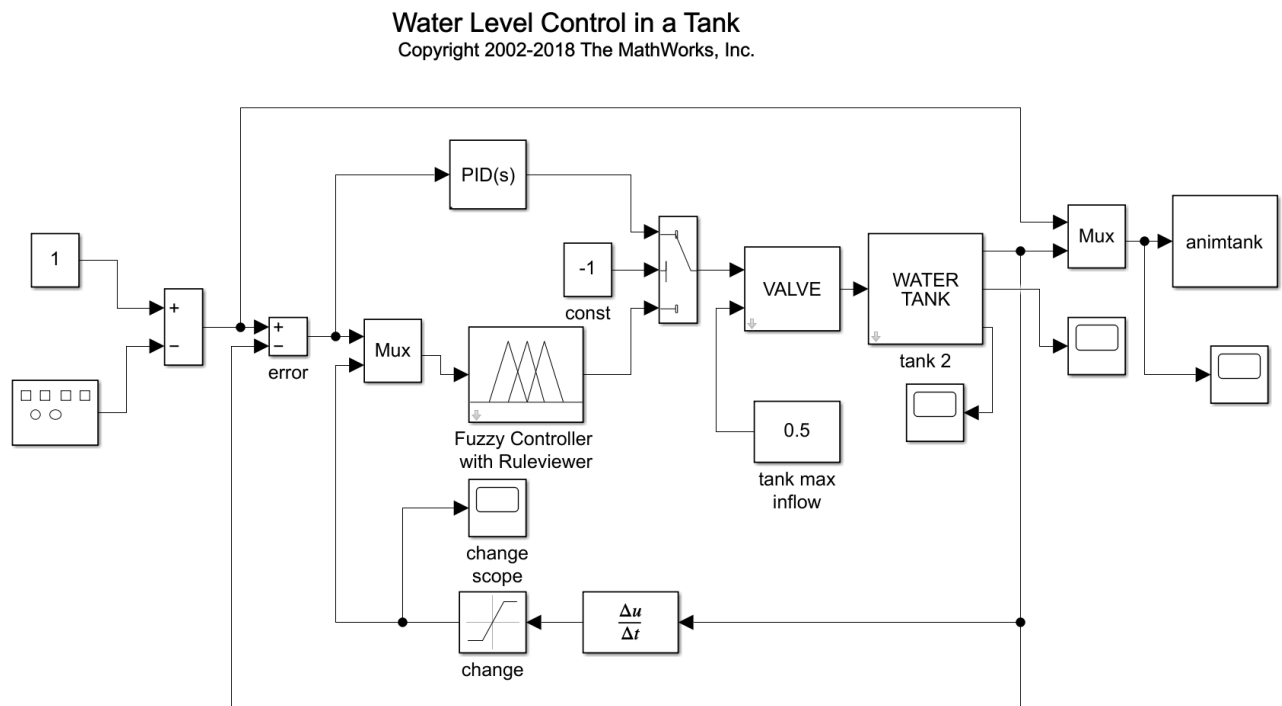


Рисунок 10 — Блок-схема системы управления

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. Подсистема вентиля 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 ψ в диапазоне от 0 до 1. На второй вход подаётся сигнал постоянного уровня Constant 2 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 объёмным расходом поступающей в резервуар жидкости $Q_{\max}(t)$, $\text{м}^3/\text{с}$.

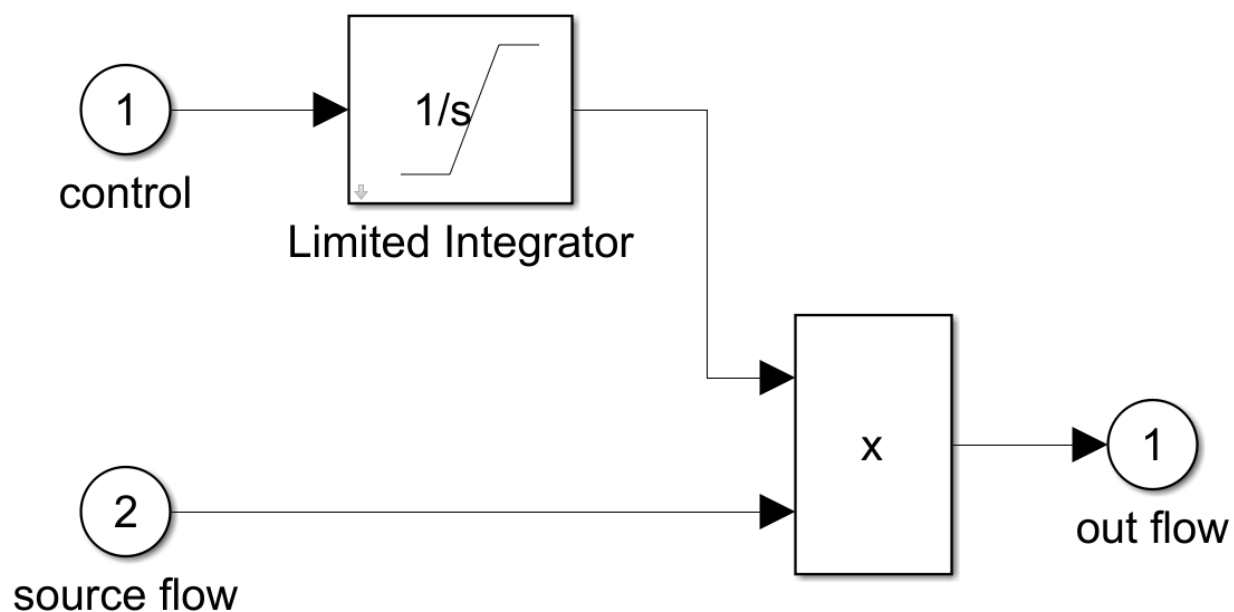


Рисунок 11 — Блок-схема подсистемы вентиля

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.