

УДК 681.544:621.039.562.26

Я.И. БЕГЛОВ, К.В. БЕГЛОВ

Одесский Национальный Политехнический Университет, Украина

**ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ
КОНЦЕНТРАЦИИ ЖИДКОГО ПОГЛОТИТЕЛЯ В ПЕРВОМ КОНТУРЕ АЭС**

На АЭС с реакторами типа ВВЭР важным заданием является контроль некоторых параметров теплоносителя. Одним из основных контролируемых параметров есть содержание борной кислоты (БК) изотопа ^{10}B в технологических растворах энергоблоков. Одним из методов регулирования есть изменение концентрации БК в теплоносителе первого контура АЭС. Статья посвящена синтезу и исследованию автоматизированной системы регулирования объекта с переменными свойствами при нанесении управляющего воздействия с разными знаками. Для автоматизации поддержания необходимой концентрации БК необходимо синтезировать регулятор. Но объект регулирования имеет разные статические и динамические характеристики при нанесении управляющего воздействия с разными знаками. Таким образом, возникает задача синтеза и исследования системы регулирования концентрации борной кислоты в теплоносителе первого контура для нелинейного объекта регулирования.

Ключевые слова: концентрация борной кислоты, автоматизированная система регулирования (АСР), регулятор.

Я.І. БЕГЛОВ, К.В. БЕГЛОВ

Одеський Національний Політехнічний Університет, Україна

**ВИКОРИСТАННЯ НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ РЕГУЛЮВАННЯ
КОНЦЕНТРАЦІЇ РІДКОГО ПОГЛИВАЧА У ПЕРШОМУ КОНТУРІ АЕС**

На АЕС з реакторами типу ВВЕР важливим завданням є контроль деяких параметрів теплоносія. Одним з основних параметрів, що контролюються є вміст борної кислоти (БК) ізотопу ^{10}B в технологічних розчинах енергоблоків. Одним з методів регулювання є зміна концентрації БК в теплоносії першого контуру АЕС. Стаття присвячена синтезу та дослідженню автоматизованої системи регулювання об'єкта зі змінними властивостями при нанесенні керуючого впливу з різними знаками. Для автоматизації підтримки необхідної концентрації БК необхідно синтезувати регулятор. Але об'єкт регулювання має різні статичні і динамічні характеристики при нанесенні керуючого впливу з різними знаками. Таким чином, виникає задача синтезу і дослідження системи регулювання концентрації борної кислоти в теплоносії першого контуру для нелінійного об'єкта регулювання.

Ключові слова: концентрація борної кислоти, автоматизована система регулювання (АСР), регулятор.

Ya.I. BEGLOV, K.V. BEGLOV

Odessa National Polytechnic University, Ukraine

**APPLICATION OF THE FUZZY REGULATOR FOR REGULATION OF THE
CONCENTRATION OF A LIQUID ABSORPTION IN THE FIRST NUCLEAR PIPE**

At NPPs with WWER-type reactors, an important task is to control certain parameters of the coolant. One of the main controlled parameters is the content of ^{10}B isotope in technological solutions of power units. One of the control methods is the change in the concentration of boric acid (BA) in the coolant of the first circuit of the nuclear power plant. The article is devoted to the synthesis and research of an automated control system for an object with variable properties when applying a control action with different signs. It is necessary to synthesize the regulator for automatic control of the required concentration of the BA. But the control object has different static and dynamic characteristics when applying a control action with different signs. Thus, the problem arises of synthesizing and researching the control system of the boric acid concentration in the coolant of the first circuit for a nonlinear control object.

Key words: concentration of boric acid, automatic control system (ASC), controller.

Постановка проблеми

Для регулирования мощности энергоблока АЭС используется, так называемое, борное регулирование, т.е. изменение концентрации борной кислоты в теплоносителе первого контура. Однако, свойства объекта регулирования нелинейны. А именно, динамические свойства объекта регулирования могут быть описаны дифференциальным звеном первого порядка, но значения коэффициентов уравнения зависят от знака управляющего воздействия. Таким образом, ставится задача синтезировать регулятор, работающий с нелинейным объектом и с заданными показателями качества переходных процессов.

Анализ последних исследований и публикаций

В многочисленных работах, посвященных проблеме покрытия переменной части графиков нагрузок [1–3], указывается, что повышение доли АЭС в общей установленной мощности требует повышенной маневренности энергооборудования АЭС, то есть работы энергоблоков АЭС в переменном режиме.

Одним из способов изменения нагрузки энергоблока является изменение энерговыделения в реакторной установке путем изменения концентрации жидкого поглотителя. Для реакторов типа ВВЭР в качестве жидкого поглотителя используется борная кислота (H_3BO_3).

Процесс изменения концентрации борной кислоты в теплоносителе первого контура называется борным регулированием (БР). Для уменьшения мощности реактора в коллектор питательного насоса подается раствор из бака с концентрированной борной кислотой, для увеличения мощности подается чистый конденсат [4]. Одновременно с этим, борная кислота выводится из теплоносителя.

В настоящее время борное регулирование состоит в дискретном вводе определённого количества H_3BO_3 или чистого конденсата в ручном режиме до получения требуемого результата. Одним из недостатков такого режима борного регулирования является большое количество жидких радиоактивных отходов (ЖРО). Как показано в [5], количество ЖРО можно существенно уменьшить, применив автоматизированную систему регулирования.

В работе [3] рассмотрена зависимость концентрации в активной зоне (АЗ) при введении БК и при введении чистого конденсата в теплоноситель первого контура. Кривые разгона по указанным каналам представлены на рис. 1.

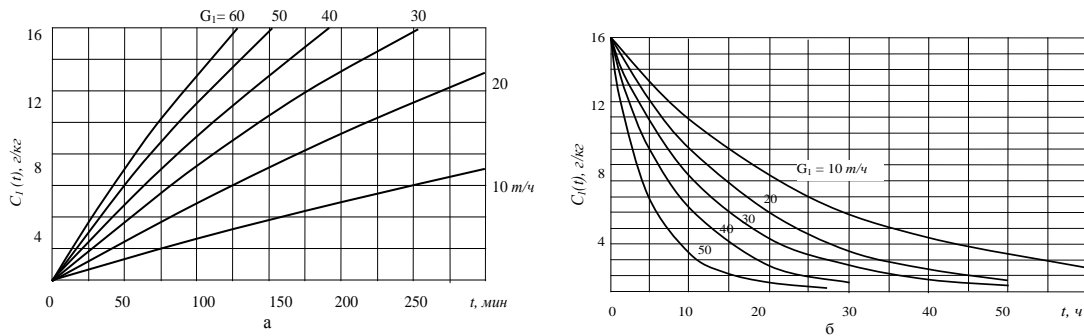


Рис. 1. Изменение концентрации борной кислоты в теплоносителе в случае подпитки концентрированной борной кислотой (а) и чистым конденсатом (б)

Для моделирования данные зависимости были идентифицированы и описаны следующими дифференциальными уравнениями:

при введении раствора борной кислоты:

$$T_1 \cdot \frac{dC_{bor}}{d\tau} + \Delta C_{bor} = k_1 \cdot \Delta G_{bor} \tag{1}$$

при введении чистого конденсата:

$$T_2 \cdot \frac{dC_{bor}}{d\tau} + \Delta C_{bor} = k_2 \cdot \Delta G_{H_2O}, \tag{2}$$

где C_{bor} – концентрация борной кислоты, г/кг;

k_1, k_2 – коэффициенты передачи, $\frac{г/кг}{м^3/ч}$;

T_1, T_2 – постоянные времени, с;

ΔG_{bor} – изменение расхода раствора борной кислоты, т/ч;

ΔG_{H_2O} – изменение расхода чистого конденсата, т/ч;

В рамках исследования было принято, что номинальный расход борной кислоты $\Delta G_{bor} = 40 \text{ м}^3/\text{ч}$, номинальный расход чистого конденсата $\Delta G_{H_2O} = 40 \text{ м}^3/\text{ч}$ [3].

Для такого расхода:

Коэффициенты передачи:

$$k_1 = 40^{2/\text{кг}}/\text{м/ч}, \quad k_2 = 16^{2/\text{кг}}/\text{м/ч};$$

постоянные времени:

$$T_1 = 22318 \text{ с}, \quad T_2 = 47715 \text{ с}.$$

Для процессов ввода и вывода бора из теплоносителя коэффициенты передачи отличаются в 2,5 раза, а постоянной времени – в 2 раза.

Для автоматизации поддержания необходимой концентрации БК необходимо синтезировать регулятор. Но объект регулирования имеет разные статические и динамические характеристики при нанесении управляющего воздействия с разными знаками.

Таким образом возникает задача синтеза и исследования системы регулирования концентрации борной кислоты в теплоносителе первого контура для нелинейного объекта регулирования.

Ранее в [6] рассматривался синтез и проводился анализ ПИ-регулятора. Основная сложность при настройке регулятора заключается в нелинейных свойствах объекта регулирования. А именно разными значениями коэффициента передачи и постоянными времени при нанесении управляющего воздействия разного знака.

Оптимальными были приняты настройки ПИ-регулятора для процесса с минимальным интегральным показателем качества и объектом, имеющим меньший коэффициент передачи и большую постоянную времени.

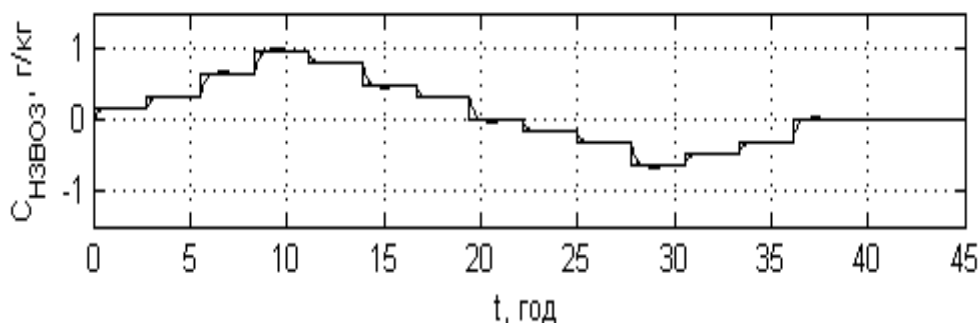


Рис. 2. График переходного процесса регулирования концентрации борной кислоты с ПИ-регулятором

Из приведенного графика видно, что даже при оптимальных настройках в системе наблюдаются колебания регулируемой величины. Поэтому была поставлена задача исследовать автоматизированную систему регулирования концентрации борной кислоты с нечетким ПИ-регулятором.

Цель исследования

Синтезировать нечеткий регулятор для улучшения качества регулирования концентрации жидкого поглотителя в теплоносителе 1-ого контура энергоблока АЭС с реактором типа ВВЭР-1000.

Изложение основного материала исследования

В работе рассматривается синтез регулятора, формирующего управляющее воздействие на основе ПИ-закона регулирования. Однако расчет коэффициентов регулятора выполняется по правилам нечеткой логики.

Для сравнения регуляторов была составлена схема для проведения имитационного моделирования в среде Simulink пакета Matlab, показанная на рис. 3.

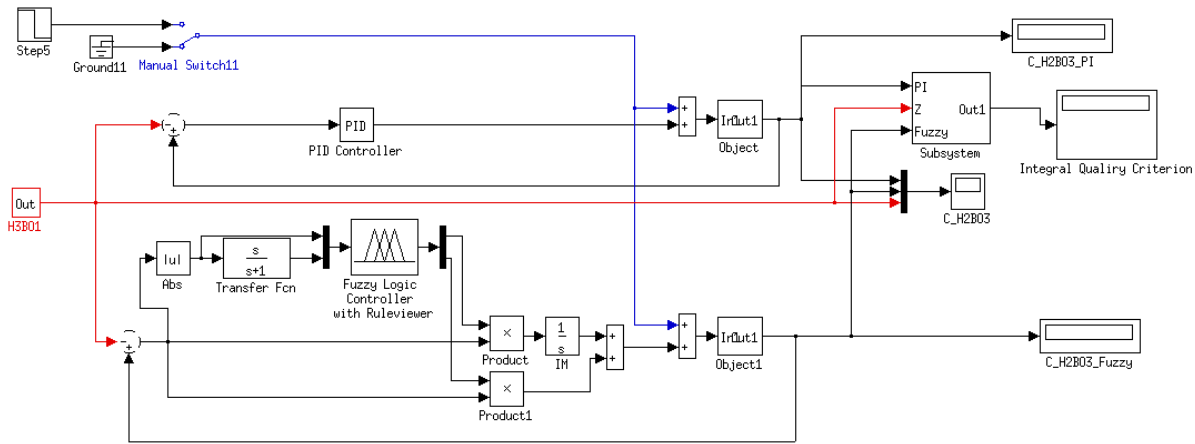


Рис. 3. Схема моделювання АСР

Блоки Subsystem и Integral Quality Criterion служат для расчета и отображения значений интегрального критерия качества переходных процессов в сравниваемых системах регулирования.

АСР с нечетким регулятором состоит из блоков расчета коэффициентов регулятора и блоков формирования ПИ-закона регулирования.

Значения коэффициентов нечеткого регулятора рассчитываются по правилам нечеткой логики на основании анализа сигнала рассогласования. На блок Fuzzy Logic Controller подается абсолютное значение сигнала рассогласования и скорость его изменения. Выходом блока являются значения настройки K_p и K_i .

Были приняты следующие диапазоны изменения входных сигналов и функции принадлежности (показанные на рис. 4 и 5)

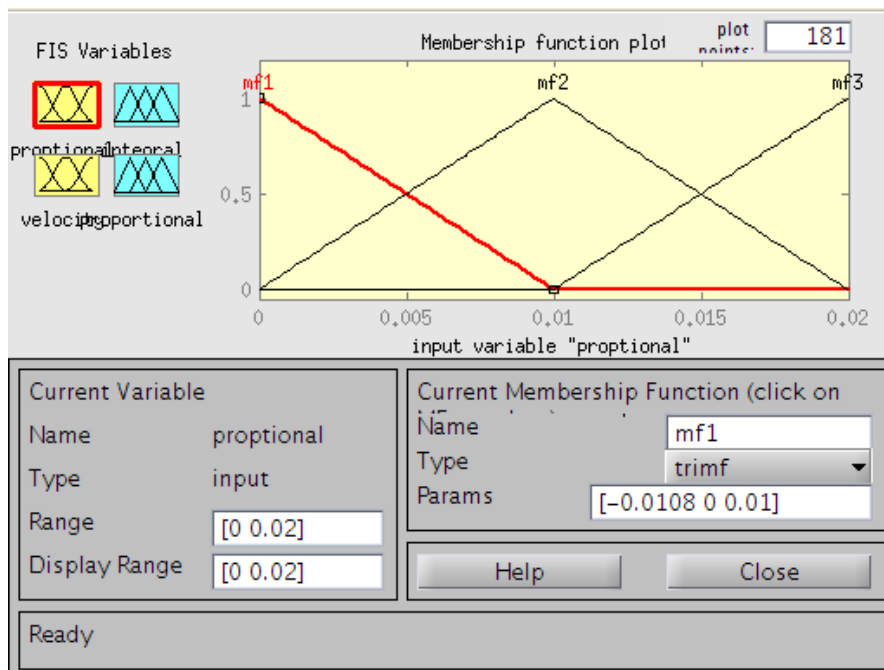


Рис. 4. Функции принадлежности для величины сигнала рассогласования

На основании исследований ПИ-регулятора [6] было принято, что сигнал рассогласования меняется в диапазоне от 0 до 0.02. Скорость изменения сигнала рассогласования также меняется в диапазоне от 0 до 0.02. Причем приняты следующие термы: "малый сигнал" от 0 до 0.01, "средний сигнал" от 0 до 0.02 с максимумом при 0.01, "большой сигнал" от 0.01 до 0.02. Такие термы были приняты и для абсолютного значения сигнала рассогласования и скорости его изменения.

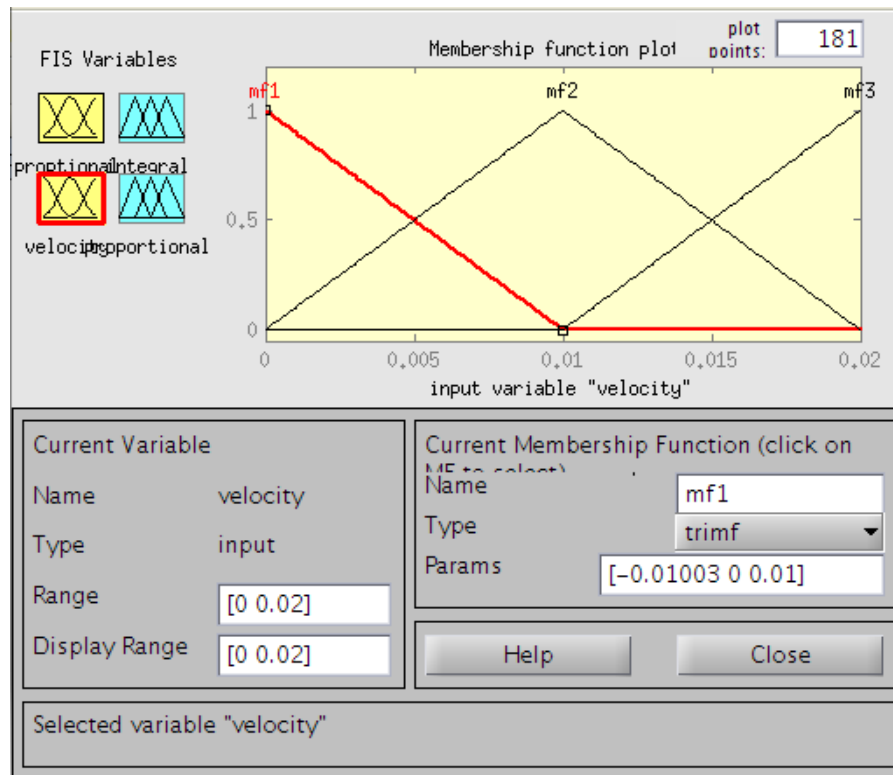


Рис. 5. Функции принадлежности скорости изменения сигнала рассогласования

Функции принадлежности для выходных сигналов показаны на рис. 6 и 7

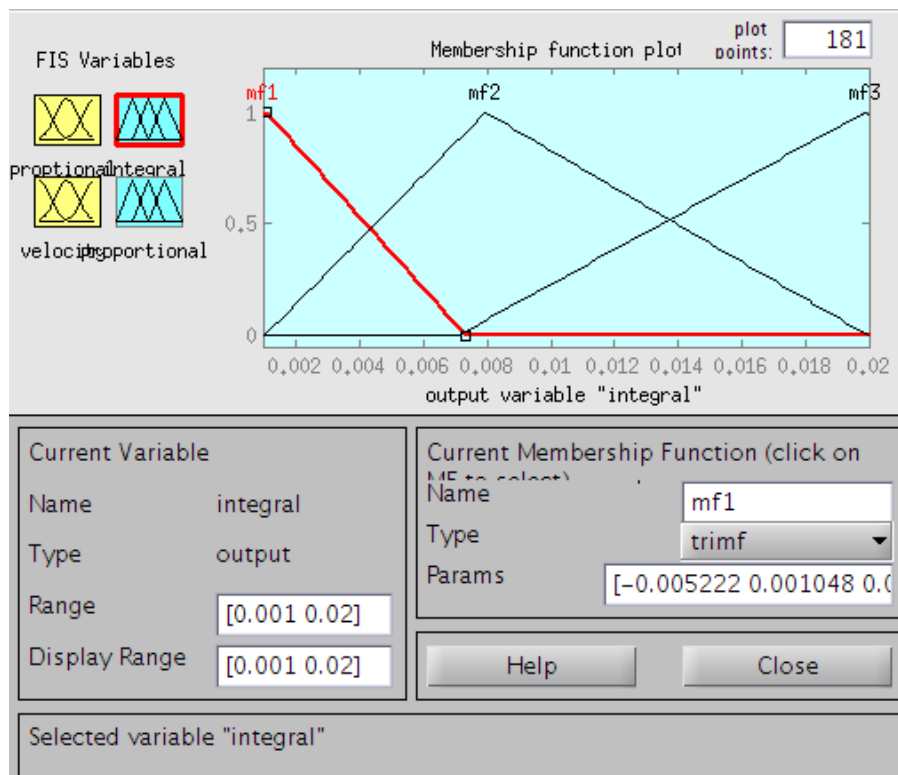


Рис. 6. Функции принадлежности для фазификации K_i

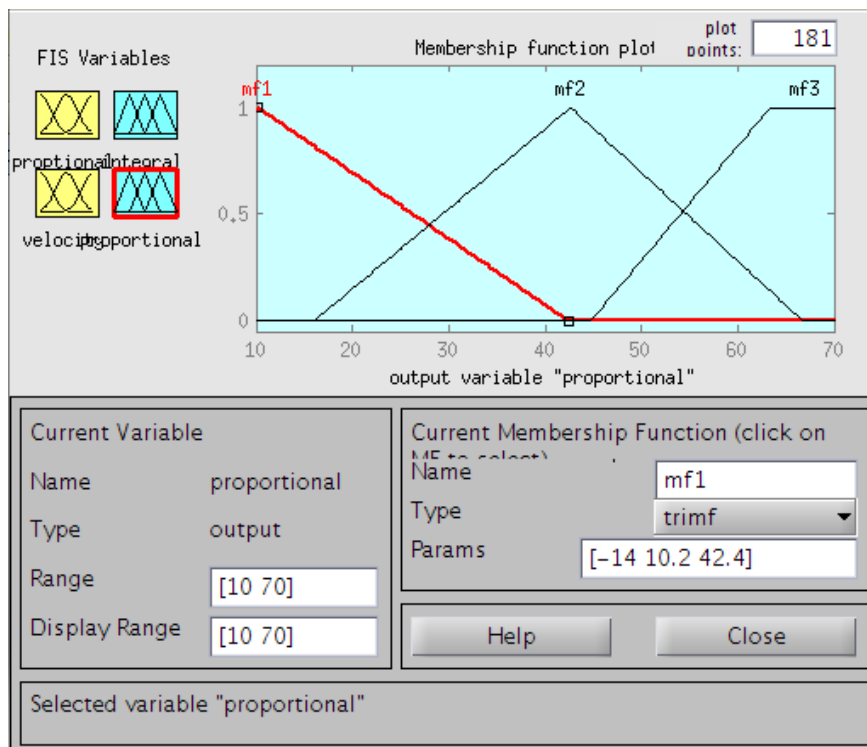


Рис. 7. Функции принадлежности для фазификации K_p

Диапазон изменения коэффициентов регулятора K_p и K_i также был принят на основании работы [6]. Коэффициент K_p (I -составляющая) изменяется в диапазоне от 10 до 70. Коэффициент K_i (I -составляющая) изменяется в диапазоне от 0 до 0,01.

Принято, что для больших значений сигнала рассогласования и скорости его изменения принимаются большие значения коэффициентов регулятора. Для малых значений сигнала рассогласования и скорости его изменения соответственно малые значения коэффициентов.

В процессе моделирования были получен график переходного процесса регулирования, который показан на рис. 8.

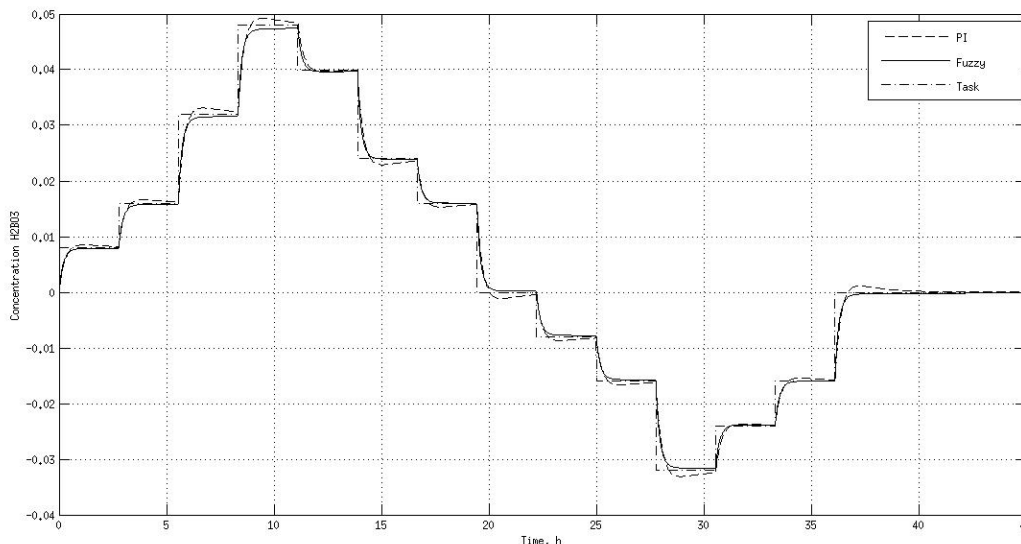


Рис. 8. График переходного процесса регулирования при изменении задания

На рис. 8 показано изменение сигнала задания (Task), отклонение регулируемой величины с применением ПИ-регулятора (PI) и отклонение регулируемой величины с применением fuzzy-регулятора (Fuzzy).

Как можно увидеть из графика fuzzy-регулятор обрабатывает сигнал задания с меньшей погрешностью. Также отсутствует перерегулирование, что является одним из требований к системе регулирования. Кроме того интегральный критерий качества переходного процесса меньше для fuzzy-регулятора ($I_{III}=0.5169$, $I_{fuzzy}=0.4108$).

Выводы

Применение ПИ fuzzy-регулятора по сравнению с линейным ПИ-регулятором для нелинейного объекта дает улучшение качества переходного процесса. А именно, отсутствуют колебания при том же времени регулирования и меньшее значение интегрального критерия качества.

Список использованной литературы

1. Беркович В.М. О возможности регулирования мощности энергосистемы с помощью атомных электростанций / В.М. Беркович, В.Ф. Горохов, В.П. Татарников // Теплоэнергетика. – 1974. – № 6. – С. 16-19.
2. Воронин Л.М. Особенности эксплуатации и ремонта АЭС / Л.М. Воронин. – М.: Энергоиздат, 1981. – 166 с.
3. Игнатенко Е.И. Маневренность реакторов типа ВВЭР / Е.И. Игнатенко, Ю.Н. Пыткин. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 83с
4. Максимов М.В. Модель реактора ВВЕР-1000 як об'єкта управління: монографія / М.В. Максимов, К.В. Беглов, Т.О. Цисельська // Сучасні технології управління. – Одеса : Вид-во Купрієнко С.В., 2012. – С. 108-122.
5. Медведев Р.Б. Оптимальное керування процесом зміни концентрації борної кислоти в теплоносії першого контуру АЕС з ВВЕР-1000 / Р.Б. Медведев, О.В. Сангінова // Наукові вісті Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". – 2002. – № 2 (22). – С. 22-28.
6. Беглов К.В. Дослідження регулятора концентрації рідкого поглинача енергоблоку АЕС / К.В. Беглов, О.О. Волошкіна, О.А. Плахотнюк // Автоматизация технологических и бизнес-процессов. – 2015. – №4. – С. 18-24;