

УДК 681.5.017

DOI: 10.15593/2224-9397/2021.2.04

И.А. Шмидт, И.А. Калинин, Н.А. ПономареваПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

ПИД-ПОДОБНЫЙ НЕЧЕТКИЙ РЕГУЛЯТОР В САР РАСХОДА ЖИДКОСТИ

В настоящее время для управления сложными, нелинейными, многосвязными объектами популярно использование нетрадиционных принципов регулирования, к которым прежде всего относятся регуляторы, основанные на принципах нечеткого управления (fuzzy controller). Использование нечетких регуляторов для управления более простыми объектами оправданно, если они сами входят в качестве подсистем в сложную комплексную систему. Одна из таких систем – система автоматического регулирования (САР) расхода воды в трубопроводе между двумя технологическими емкостями. Так как в реальных трубопроводах присутствуют сложные физические процессы, параметры которых неочевидны, использование нечеткого регулятора оправданно даже при автономном регулировании расхода. Одной из проблем нечеткого регулирования является отсутствие разработанных процедур синтеза параметров регулятора, подобных синтезу ПИД-регулятора. **Цель исследования:** разработать методику синтеза параметров функций принадлежности для нечеткого регулятора, эквивалентного ПИД-регулятору, для САР расхода жидкости между двумя технологическими емкостями. **Методы:** разработка базы правил нечеткого регулятора и синтез его параметров для САР расхода на основе параметров классического ПИД-регулятора. **Результаты:** для учета характеристик и особенностей системы управления был произведен синтез объекта управления – сетевой насос. Проектирование регуляторов было осуществлено в среде разработки LabVIEW с использованием библиотеки Control Design and Simulation. Классический ПИД-регулятор выступает в роли эталонной модели, построенной на основе синтеза системы. На основе эталонного ПИД-регулятора был разработан эквивалентный ему нечеткий регулятор. При этом рассмотрена методика формального синтеза параметров такого нечеткого регулятора. Было выявлено расхождение в поведении систем, возникающее вследствие «лобового» применения дефаззификации. Предложено усложнение правил для коррекции этой ошибки. По результатам моделирования было показано, что регулятор на нечеткой логике не уступает в качестве управления классическому ПИД-регулятору.

Ключевые слова: нечеткое управление, ПИД-регулятор, технический оптимум, LabView, интегральное насыщение.

I.A. Shmidt, I.A. Kalinin, N.A. Ponomareva

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

PID-LIKE FUZZY REGULATOR IN THE AUTOMATIC LIQUID FLOW REGULATION SYSTEM

Currently, for the management of complex, nonlinear, multi-connected objects, it is popular to use non-traditional control principles, which primarily include regulators based on the principles of fuzzy control (fuzzy controller). The use of fuzzy controllers to control simpler objects is justified if they themselves are included as subsystems in a complex system. One of these systems is the automatic regulation system (ARS) of the water flow rate in the pipeline between two technological containers. Since real pipelines contain complex physical processes, the parameters of which are not obvious, the use of a fuzzy regulator is justified even with autonomous flow control. One of the problems of fuzzy control is the lack of developed procedures for the synthesis of controller parameters, similar to the synthesis of a PID controller. **Purpose of the research:** to develop a method for synthesizing the parameters of membership functions for a fuzzy controller equivalent to a PID controller for the automatic regulation system of the water flow rate between two technological tanks. **Methods:** development of a rule base for a fuzzy controller and synthesis of its parameters for the automatic regulation system of water flow based on the parameters of a classical PID controller. **Results:** the control object was synthesized to take into account the characteristics and features of the control system. The result of the synthesis is a network pump. The design of the regulators was carried out in the LabVIEW development environment using the Control Design and Simulation library. The classical PID controller acts as a reference model built on the basis of system synthesis. Based on the reference PID controller, an equivalent fuzzy controller has been developed. At the same time, the technique of formal synthesis of the parameters of such a fuzzy controller is considered. A discrepancy in the behavior of the systems arising from the "frontal" use of defuzzification was revealed. A complication of the rules for correcting this error is proposed. Based on the simulation results, it was shown that the fuzzy logic controller is not inferior in quality to the classical PID controller.

Keywords: fuzzy control, PID controller, technical optimum, LabView, integral saturation.

Введение

Цифровые регуляторы являются ключевым звеном для управления процессами на промышленных объектах. Поскольку промышленные объекты – это реальные физические системы [1], состоящие из сложных, нелинейных [2], многосвязных объектов, то в них должны присутствовать сложные физические процессы, параметры которых меняются неоднозначно. При управлении такими процессами традиционные способы управления – это классические регуляторы: пропорциональный (П); пропорциональный-интегральный (ПИ); пропорциональный-дифференциальный (ПД). ПИД [3] могут не обеспечить требуемый результат, следовательно, имеет смысл применение нетрадиционных способов, к которым, прежде всего, относятся регуляторы, основанные на принципах нечеткого управления [4] (fuzzy controller).

Помимо классических и нечетких методов управления существуют системы, которые комбинируют эти два типа управления, что зачастую является нецелесообразным. В таких случаях мы можем полностью заменить классическое управление нечетким регулятором, который будет работать не хуже, а порой и лучше, чем классический регулятор. Также применение нечетких регуляторов оправданно и для управления более простыми объектами, если они сами входят в качестве подсистем в сложную [5] комплексную систему.

Одна из таких систем – система автоматического регулирования (САР) расхода жидкости в трубопроводе между двумя технологически емкостями. Так как в реальных трубопроводах присутствуют сложные физические процессы, параметры которых неочевидны, использование нечеткого регулятора оправданно даже при автономном регулировании расхода из-за того, что неоднородность и сложность процессов, происходящих в системе, можно учесть в нечетких правилах, которые позволяют достичь требуемого качества управления без введения дополнительных надстроек, в отличие от случая с применением традиционных регуляторов. Однако одной из проблем нечеткого регулирования является отсутствие разработанных формальных процедур синтеза параметров регулятора, подобных синтезу ПИД-регулятора.

Обзор

Существует большое количество публикаций, посвященных разработке, внедрению, анализу нечетких регуляторов для различных видов систем. Наибольший интерес для нашей работы представляют публикации, которые содержат в себе примеры применения или сравнения двух типов регуляторов: классического (ПИД) и нечеткого. В свою очередь публикации с использованием обоих типов регуляторов делятся на две подгруппы: использование комбинированных регуляторов и применение обоих типов регуляторов отдельно.

Сначала рассмотрим пример [6], где описан способ применения, комбинированного регулятора (классический и нечеткий объединены в один регулятор). В данной статье приведены примеры применения комбинированного регулятора для различных систем управления. В рассматриваемых системах комбинированный регулятор представлен в виде ПИД-регулятора, значения коэффициентов которого (пропорциональный, интегральный, дифференциальный) задаются нечеткой

системой управления, которая выступает в качестве надсистемы рассматриваемых систем управления. Недостатком таким систем является избыточная сложность их проектирования и настройки. Как показано ниже, мы можем полностью заменить часть, представленную классическим регулятором, нечетким, который будет работать не хуже, а порой и лучше, чем классический регулятор.

В простых системах управления объектами, которые сами входят в качестве подсистем в сложную комплексную систему, в основном используются в различных вариантах исполнения классические и нечеткие регуляторы. Подобный случай рассматривается в статье [7], где приведен пример применения обоих типов регуляторов (нечеткого и классического) для управления процессом подачи воздуха и газа на вход в котел и дальнейшего удаления продуктов сгорания. В данной статье было показано, как можно оценить правильность выбора параметров для регулятора на нечеткой логике, сравнив результат его работы с эталонным ПИ-регулятором, что позволяет избежать ошибки при проектировании системы регулирования на основе правил нечеткой логики при задании форм функций принадлежности.

Пример сравнения двух типов регуляторов приведен в статьях [8–10]. В статье [8] представлен пример применения регуляторов двух типов для управления скоростью двигателя постоянного тока. В этой работе приведена сравнительная таблица использования двух моделей регуляторов (ПИ-регулятор, нечеткий-ПИ-регулятор). По результатам анализа совокупности всех рассматриваемых параметров качества системы управления скоростью двигателя (время набора определенного количества оборотов, ошибка регулирования, стартовый ток и т.д.) лучший результат показал регулятор, построенной на основе правил нечеткой логики.

Отдельно выделим статьи [9] и [10], так как объект управления, рассматриваемый в данных статьях, – технологическая емкость с водой – похож на объект, исследуемый в нашей статье. В статье [9] рассматривается система управления уровнем воды для технологической емкости с использованием нечеткого и ПИД-регуляторов. Приведен сравнительный анализ двух способов регулирования. Наилучший результат показал нечеткий регулятор. По сравнению с ПИД-регулятором при его использовании уменьшается время переходного процесса и нет перерегулирования.

В статье [10] в отличие от статьи [9] приведен пример синтеза объекта управления, что позволяет более точно подобрать параметры ПИД-регулятора. В результате исследования было доказано, что регулятор на нечеткой логике не имеет перерегулирования и срабатывает быстрее, чем ПИД-регулятор. Похожие системы управления уровнем жидкости применяются для промышленных объектов, таких как водоочистительные сооружения, обрабатывающая промышленность, где важным параметром системы является требуемый уровень в резервуаре.

Одним из главных недостатков моделей систем в статьях, рассмотренных в обзоре, является представление систем в виде «черного ящика», управляющее воздействие в которых осуществляется за счет ошибки рассогласования входного и выходного сигналов, и в зависимости от характеристик системы подбираются соответствующие параметры регулятора. Это можно сделать вручную на примере ПИД-регулятора, меняя значение коэффициентов, влияющих на пропорциональную, интегральную и дифференциальные составляющие ошибки регулирования, или на примере нечеткого регулятора, меняя функции принадлежности для каждой составляющей ошибки регулирования (пропорциональная, интегральная, дифференциальная). Но существует ряд задач, где нет возможности искать нужные значения коэффициентов экспертным способом, необходимо сразу правильно подобрать значения параметров регулятора для этого необходимо произвести синтез объекта управления, на основе которого подбирается модель регулятора. Подобный пример был рассмотрен в статье [10], но при просмотре данной статьи был выявлен один существенный недостаток – нет описания процессов фаззификации и дефазификации входных и выходных данных. Другими словами, правила, по которым строятся функции принадлежности, составлены на основе ошибки и ее производной, и нет пояснения, почему выбраны те или иные формы функций принадлежности для выбранной системы в отличие от ПИД-регулятора, коэффициенты которого были выбраны в соответствии с проведенным синтезом системы.

Одним из способов решить проблему синтеза параметров является применение так называемых нейронечетких регуляторов [11, 12], в которых подбор параметров регулятора производится с помощью нейросети. Альтернативным способом настройки нечетких регуляторов является подбор их параметров при помощи генетических алгоритмов [13, 14].

Основная цель и задачи

Основной целью данной работы является исследование методики синтеза [15] параметров функций принадлежности [16] для нечеткого регулятора, эквивалентного ПИД-регулятору, на примере САР-расхода воды (или любой другой жидкости) между двумя технологическими емкостями. Новизна данной методики заключается в том, что предлагается строгий формальный синтез параметров без подбора или адаптивных процедур. Параметры функций принадлежности нечеткого регулятора рассчитываются на основе предварительно синтезированных коэффициентов классического ПИД-регулятора. Также учитывается отличие его в поведении от классического ПИД-регулятора, возникающее из-за способа дефазификации.

Система расхода была выбрана в качестве модельной, так она хорошо изучена и при этом может являться частью более сложной системы водоснабжения и/или водоотведения для управления которой могут применяться методы нечеткого управления [17,18]. Как уже было отмечено, применение локальных нечетких регуляторов оправданно, если они сами входят в качестве подсистем в более сложную систему, также управляемую нечеткими алгоритмами.

Задачи, которые необходимо решить:

1. Произвести синтез ПИД-регулятора для САР расхода и промоделировать его работу в среде разработки LabView.
2. Разработать методику синтеза параметров функций принадлежности для нечеткого регулятора, эквивалентного классическому ПИД-регулятору. Произвести согласно разработанной методике синтез нечеткого ПИД-регулятора для САР расхода жидкости и промоделировать его работу в среде разработки LabView.
3. Произвести сравнительный анализ моделирования систем с разными регуляторами.
4. Модернизировать алгоритмы управления с учетом проведенного анализа для улучшения качества регулирования для обоих типов регуляторов.

Синтез ПИД-регулятора

Для того чтобы правильно выбрать параметры классического ПИД-регулятора, необходимо произвести синтез объекта управления для САР расхода жидкости. В ее состав входят: сетевой насос (преоб-

разователь частоты, двигатель, насос), цифровые и аналоговые датчики (преобразователи расхода), регулятор расхода (ПЛК). Обратная связь в этих системах управления осуществляется при помощи цифровых и аналоговых датчиков (преобразователь расхода), а сам процесс управления сводится к устранению ошибки между выходным сигналом с исполнительного механизма (насоса) и сигналом управления, поступающим с ПЛК, который, в свою очередь, входит в состав регулятора расхода (рис. 1).

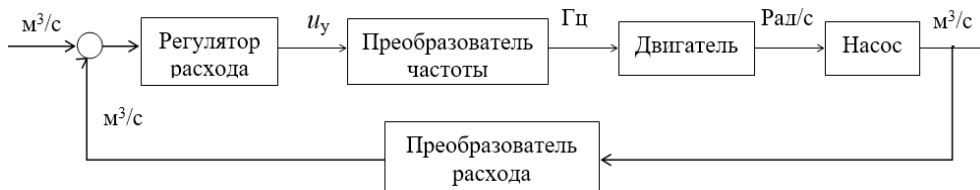


Рис. 1. Система поддержания требуемого расхода жидкости в трубопроводе

Цель синтеза системы автоматического управления (САУ) – улучшение качества управления с учетом особенностей построения системы. Для задачи поддержания постоянной величины расхода с течением времени ($Q_n = \text{const}$) с условием, что при подаче ступенчатого воздействия (открытие клапана) система должна как можно быстрее выйти на требуемый уровень расхода и удерживать это значение, синтез заключается в представлении отдельных элементов сетевого насоса в виде передаточных функции $W(p)$, которые, в свою очередь, будут выглядеть как апериодические звенья первого порядка:

$$W(p) = \frac{Q(p)}{X(p)} = \frac{K}{Tp+1}. \quad (1)$$

Представим объект управления – сетевой насос в виде отдельных элементов: частотный преобразователь, электродвигатель, насос. Для каждого элемента вычислим передаточную функцию по формуле (1) с учетом его физических характеристик.

Настройку системы произведём на технический оптимум [19]. Система будет иметь наилучшие (оптимальные) переходные процессы, если передаточная функция ее разомкнутой цепи будет иметь вид:

$$W_{\text{ж}}(p) = \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p+1)}. \quad (2)$$

Передаточная функция ОУ:

$$W_{OY}(p) = \frac{5}{0,01p + 1} \cdot \frac{6,06}{0,05p + 1} \cdot \frac{0,00066}{0,4p + 1} \quad (3)$$

$$W_{OC}(p) = K_{IP} = 50. \quad (4)$$

Рассчитаем регулятор по формуле:

$$W_{PEГ}(p) = \frac{W_{ж}}{W_{OY} \cdot W_{OC}} = \frac{1}{0,02 \cdot p \cdot (0,01p + 1)} \cdot \frac{0,01p + 1}{5} \cdot \frac{0,05p + 1}{6,06} \times$$

$$\times \frac{p + 1}{0,00066} \cdot \frac{1}{50} = \frac{50 \cdot (0,05p + 1) \cdot (0,4p + 1)}{p} = \frac{1p^2 + 22,5p + 50}{p} =$$

$$= 1p + 22,5 + \frac{50}{p}.$$
(5)

Структурная схема системы управления с ПИД-регулятором приведена на рис. 2.

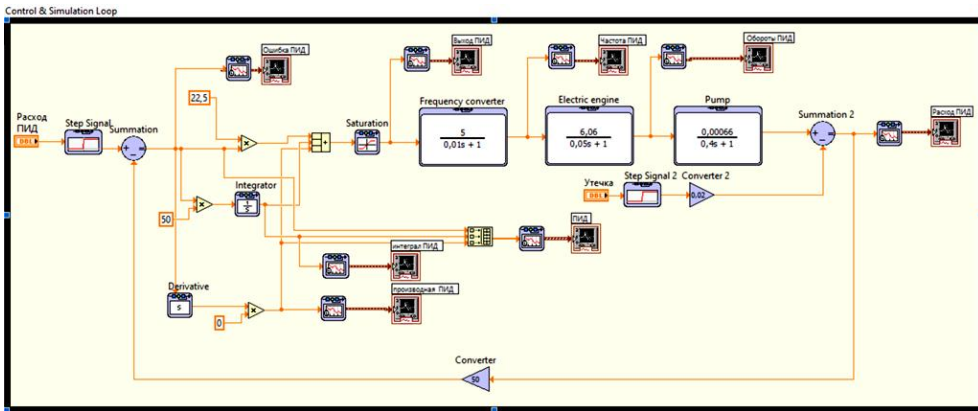


Рис. 2. Структурная схема системы в среде Labview с использованием пакета Control and Simulation

Поскольку рассматриваемая САУ расхода между двумя технологическими емкостями является реальной системой, то на характеристики элементов, входящих в ее состав, накладывается ряд ограничений. Самым значимым из них является выходной сигнал управления, поступающий с регулятора САУ, он ограничен по модулю и не может быть больше 10 В.

Теперь рассмотрим синтез нечеткого ПИД-регулятора, который будет выполнен на базе рассчитанных коэффициентов классического ПИД-регулятора.

Синтез ПИД-подобного нечеткого регулятора

ПИД-подобные нечеткие регуляторы подобно классическим ПИД-регуляторам получают на входе ошибку управления, интеграл от ошибки и её производную. Входной сигнал преобразуется в нечеткую форму с помощью блока фаззификации [20], после чего в блоке логического вывода формируется нечеткая выходная переменная – управляющее воздействие.

После дефаззификации на объект управления поступает «четкий» сигнал управления.

Конструирование функций принадлежности и базы правил является основной проблемой при настройке нечеткого регулятора ПИД-типа для конкретного объекта управления. Определяем следующие лингвистические переменные: входные переменные (ошибка, интеграл ошибки, производная ошибки), выходную переменную (управляющее воздействие). Реализуем регулятор с двумя функциями принадлежности для каждой лингвистической переменной: отрицательный терм, положительный терм. Данные термы будут симметричны относительно нуля, что значительно упрощает настройку регулятора.

База правил создана как набор логических высказываний и отражает алгоритм работы регулятора. Применяются правила следующего типа: *IF* “утверждение” *THEN* “результат”. Наиболее наглядно способ синтеза нечеткого ПИД-регулятора описан в [21]. Основную идею правил нечеткого ПИД-подобного регулирования можно сформулировать так:

- если ошибка больше нормы и отклонение растет и скорость роста увеличивается, то уменьшаем управляющее воздействие;
- если ошибка меньше нормы и отклонение падает и скорость падения увеличивается, то увеличиваем управляющее воздействие.

С учетом изложенного выше, а также известного алгоритма работы ПИД-регулятора можем сформировать следующие правила системы нечеткого вывода:

1. *IF* 'Ошибка' *IS* 'ОшибкаОтрицательная' *THEN* 'Воздействие' *IS* 'Уменьшить'.
2. *IF* 'Ошибка' *IS* 'ОшибкаПоложительная' *THEN* 'Воздействие' *IS* 'Увеличить'.
3. *IF* 'Интеграл' *IS* 'ИнтегралОтрицательный' *THEN* 'Воздействие' *IS* 'Уменьшить'.

4. IF 'Интеграл' IS 'ИнтегралПоложительный' THEN 'Воздействие' IS 'Увеличить'.

5. IF 'Производная' IS 'ПроизводнаяОтрицательная' THEN 'Воздействие' IS 'Уменьшить'.

6. IF 'Производная' IS 'ПроизводнаяПоложительная' THEN 'Воздействие' IS 'Увеличить'.

Как уже отмечалось в работах, посвященных исследованию нечетких ПИД-подобных регуляторов, функции принадлежности приводятся обычно «как есть» [10]. Далее предлагается метод построения функций принадлежности [15] для выбранных термов, основанный на использовании известных коэффициентов ПИД-регулятора. Данный метод позволяет построить нечеткий регулятор как аналог эталонного или классического ПИД-регулятора, который, в свою очередь, построен на основе синтеза системы. Таким образом, появляется возможность избежать ошибки при проектировании САР, в которой нет возможности подбора ее коэффициентов вручную.

Структурная схема системы с моделью нечеткого регулятора изображена на рис. 3.

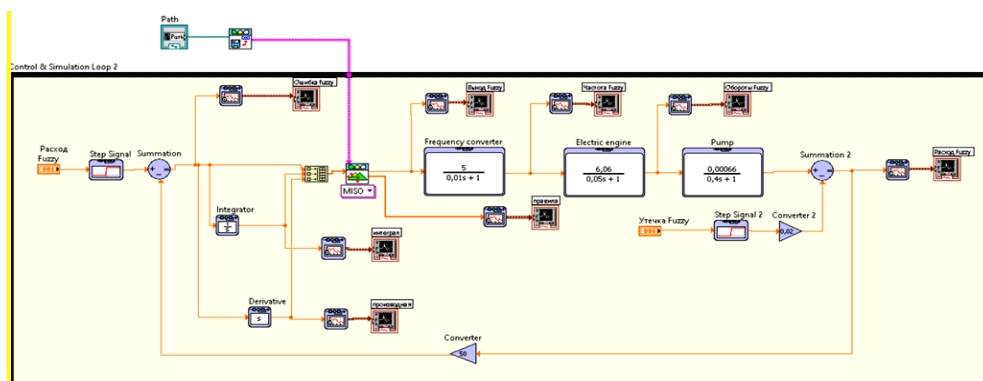


Рис. 3. Структурная схема САР расхода с нечетким регулятором в среде Labview

Рассмотрим более подробно построение функций принадлежности (ФП) для нечеткого регулятора САР расхода. Так как по логике работы системы при увеличении ошибки управления (и других входных переменных) происходит пропорциональное увеличение вклада соответствующего правила вплоть до достижения уровня насыщения,

естественно для каждой лингвистической переменной определять ФП трапецеидальной формы.

Для ее определения ее формы необходимо найти 4 значения входной переменной: *left base*, *left top*, *right top*, *right base*.

Значения крайних вершин ФП (наиболее отдалённых от нуля) выбираются, исходя из диапазона изменения значений переменных: «Ошибка» $\in [-10;10]$, «Интеграл ошибки» $\in [-50;50]$, «Производная ошибки» $\in [-50;50]$, «Управляющее воздействие» $\in [-10;10]$.

Используя полученные ранее коэффициенты ПИД-регулятора, вычислим по (6) значения двух вершин функций принадлежности, ближайших к нулю, для входных переменных.

$$x_{top\ left,top\ right} = \pm \frac{x_{max}}{k_{п,и,д}} \quad (6)$$

где x_{max} – максимальное отклонение величины ошибки, а $k_{п,и,д}$ – значения коэффициентов ПИД-регулятора.

Таким образом, функции принадлежности для случая отклонения входных переменных в отрицательную сторону определены следующим образом:

$$\mu_{\text{ОшибкаОтрицательная}}(x) = \begin{cases} 0, & x \in (-\infty, -10), \\ 1, & x \in [-10, -0,44], \\ \frac{(x-0,44)}{(-0,44)}, & x \in (-0,44, 0], \\ 0, & x \in (0, +\infty). \end{cases} \quad (7)$$

$$\mu_{\text{ИнтегралОтрицательный}}(x) = \begin{cases} 0, & x \in (-\infty, -50), \\ 1, & x \in [-50, -0,2], \\ \frac{(x-0,2)}{(-0,2)}, & x \in (-0,2, 0], \\ 0, & x \in (0, +\infty). \end{cases} \quad (8)$$

$$\mu_{\text{ПроизводнаяОтрицательная}}(x) = \begin{cases} 0, & x \in (-\infty, -50), \\ 1, & x \in [-50, -10], \\ \frac{(x-10)}{(-0,10)}, & x \in (-10, 0], \\ 0, & x \in (0, +\infty). \end{cases} \quad (9)$$

Для отклонения входных переменных в положительную сторону описание функций принадлежности будет симметричным.

Полученные функции принадлежности изображены на рис. 4.

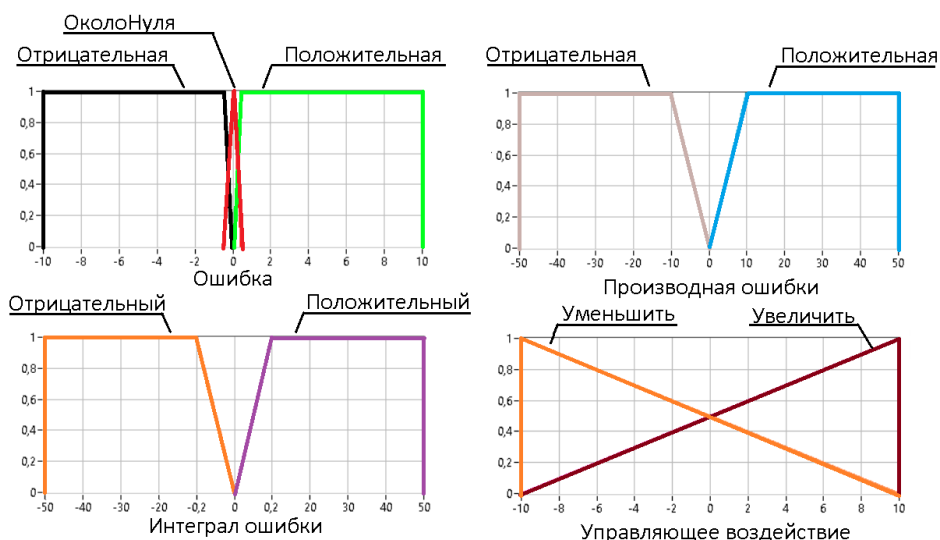


Рис. 4. Функции принадлежности лингвистических переменных

Сравнительный анализ работы двух моделей регуляторов

Промоделируем работу двух типов регуляторов (классического и нечеткого) для САР расхода при различных значениях задания расхода и проведем сравнительный анализ переходных процессов [23], полученных в результате моделирования. Графики переходных процессов при различном задании расхода и утечки изображены на рис. 5.

По графикам переходных процессов можно сделать следующие выводы о качестве управления при использовании двух типов регуляторов для САР расхода жидкости:

1. При использовании обоих типов регуляторов для САР расхода наблюдается большой процент перерегулирования при малых значениях расхода, но небольшое время переходного процесса;
2. Система с нечетким регулятором помимо перерегулирования имеет статическую ошибку при определенном значении задания значения расхода, которая через некоторое время исчезает;
3. С увеличением задания значения расхода увеличивается время переходного процесса в системе с нечетким регулятором более чем в 4 раза по сравнению с системой с ПИД-регулятором;
4. При использовании обоих типов регуляторов САР расхода выходит на требуемый уровень задания – цель управления достигается.

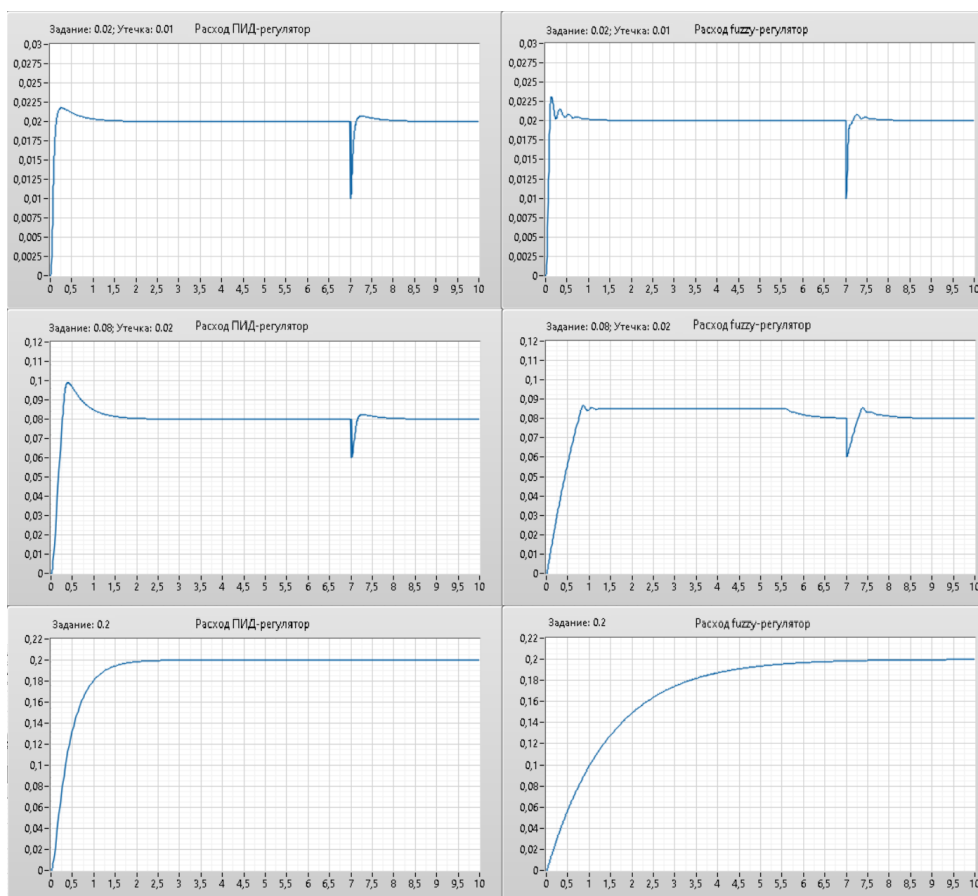


Рис. 5. Переходные процессы при различном задании расхода и утечки жидкости

Модернизация моделей регуляторов. Уменьшение времени переходного процесса в системе с нечетким регулятором

Рассматривая полученные графики ПП синтезированных систем (см. рис. 5), было обнаружено, что при большом значении расхода система с нечетким управлением имеет время переходного процесса в 4 раза больше по сравнению с системой с классическим регулятором.

В ходе анализа графиков ПП регуляторов было выявлено, что причиной замедления ПП является несоразмерно большой вклад правила: «IF 'Производная' IS 'ПроизводнаяОтрицательная' THEN 'Воздействие' IS 'Уменьшить'». Так как результатом нечеткого логического вывода может быть несколько термов выходной переменной, то метод дефаззификации должен определить, какой из термов выбрать. Мы используем метод центра максимума.

В данном методе центра максимумов находится среднее арифметическое элементов универсального множества, имеющих максимальные степени принадлежности. Для примера рассмотрим точку на ПП, в которой вклады от пропорциональной и дифференциальной составляющих будут равны 10 и -4 . В терминах нечеткого управления это означает, что результатом логического вывода будут два термина:

- 1) «Увеличить» на 10;
- 2) «Уменьшить» на 4.

Результирующим выходным воздействием станет 3, а не 6, как это было бы в случае ПИД-регулятора. Таким образом, управляющее воздействие и соответственно скорость выхода на требуемое значение расхода значительно уменьшались под влиянием некорректно рассчитанного вклада дифференциальной составляющей. Ставится задача коррекции ошибки, возникающей из-за способа дефаззификации, за счет уточнения правила.

Задачу ускорения переходного процесса предлагается решить ограничением влияния дифференциальной составляющей на начальном этапе процесса управления, чтобы наименьшим образом тормозить управление и при этом уменьшить перерегулирование в системе при приближении значения ошибки к нулю. Для этого добавляем симметричное терм-множество «ОколоНуля» треугольной формы для входной переменной «Ошибка» (см. рис. 4). Данная функция принадлежности необходима для того, чтобы правило вступало в силу в тот момент, когда ошибка уменьшится до такого значения, при котором оно уже не будет сильно тормозить переходный процесс. Задаём крайние точки функции, используя полученные ранее по формуле (6) значения вершин функций принадлежности «ОшибкаОтрицательная» ($x_{top\ right}$) и «ОшибкаПоложительная» ($x_{top\ left}$) для входной переменной «Ошибка». Таким образом, функция принадлежности определена по формуле:

$$\mu_{\text{ОшибкаОколоНуля}}(x) = \begin{cases} 0, & x \in (-\infty, -0,44), \\ \frac{(x-0,44)}{(-0,44)}, & x \in [-0,44 + 0,44], \\ 0, & x \in (0,44 + \infty). \end{cases} \quad (10)$$

В базу добавляем следующие правила:

1. «IF 'Производная' IS 'ПроизводнаяОтрицательная' AND 'Ошибка' IS 'ОколоНуля' THEN 'Воздействие' IS 'Уменьшить'»;

2. «IF 'Производная' IS 'Производная Положительная' AND 'Ошибка' IS 'Около Нуля' THEN 'Воздействие' IS 'Увеличить'».

Полученные графики переходного процесса изображены на рис. 6.

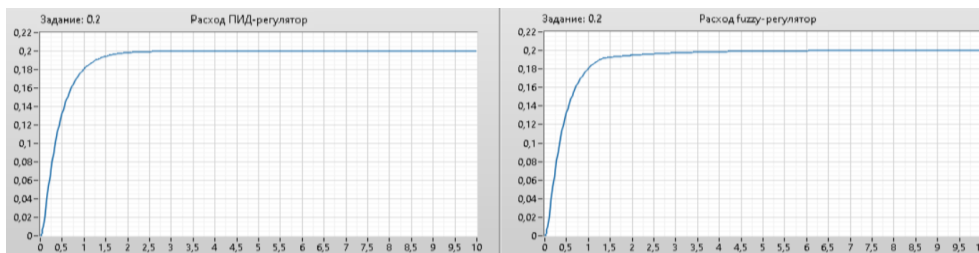


Рис. 6. Графики переходных процессов изменения расхода жидкости систем с ПИД-регулятором и нечетким управлением с дополнительными правилами

Задача коррекции ошибки учёта дифференциальной составляющей, возникающей вследствие «лобового» применения дефаззификации, таким образом решена: время переходного процесса системы с нечетким регулятором получилось равным времени системы с классическим регулятором.

Модернизация моделей регуляторов. Интегральное насыщение

В исследуемой САР расхода в ходе тестирования двух моделей регуляторов было отмечено перерегулирование свыше 5 %, несмотря на его значительное уменьшение благодаря дифференциальной составляющей. Такое перерегулирование сильно ухудшает качество управления.

Анализируя переходные процессы изменения управляющих воздействий регуляторов и изменения интегральных составляющих в процессе регулирования, можно заметить следующую закономерность. Регулятор некоторое время находится в насыщении. В это время сигнал рассогласования не равен нулю, и соответственно интегратор продолжает интегрировать. Сигнал на его выходе растёт, но этот сигнал не участвует в процессе регулирования и не воздействует на объект вследствие эффекта насыщения. Система управления в этом случае становится эквивалентной разомкнутой системе, сигнал на входе которой равен уровню насыщения управляющего сигнала. Только после выхода регулятора из насыщения интегральная составляющая начинает уменьшаться и устанавливается на величине заданного расхода (рис. 7).

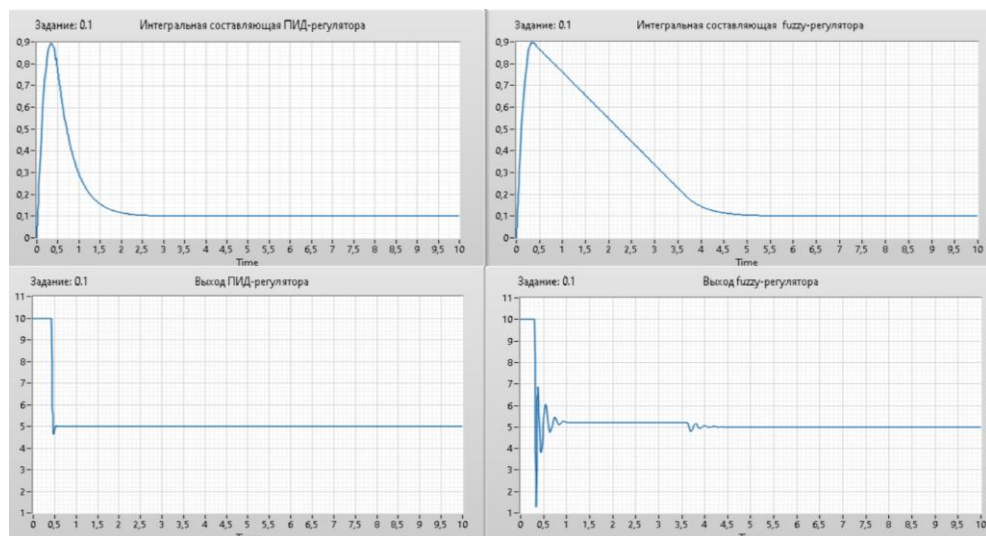


Рис. 7. Графики ПП управляющих воздействий ПИД-регулятора и нечеткого ПИД-подобного регулятора; графики ПП интегральной составляющей ПИД-регулятора и нечеткого ПИД-подобного регулятора

Как следствие данного эффекта, на графике изменения расхода присутствует нежелательное для данной системы перерегулирование.

Описанное выше явление называется «интегральным насыщением». Методы устранения интегрального насыщения обычно являются предметом изобретений, относятся к коммерческой тайне фирм-производителей и защищаются патентами. Ниже рассмотрены несколько таких идей, описанных в литературе [24–27]:

1. Компенсация с помощью дополнительной обратной связи. В системе вырабатывается сигнал рассогласования между выходом регулятора до ограничения и после. Если данная ошибка равна нулю, это эквивалентно отсутствию компенсатора, и получаем обычный ПИД-регулятор. Если же регулятор входит в насыщение, то ошибка получается отрицательной. При этом сигнал на входе интегратора уменьшается на величину этой ошибки, что приводит к замедлению роста сигнала на выходе интегратора, уменьшению сигнала рассогласования и величины выброса на переходной характеристике системы. Переходный процесс получается быстрым, плавным, и полностью исключается перерегулирование.

2. Алгоритмический запрет интегрирования. Метод состоит в том, что контроллер следит за величиной управляющего воздействия

на объект, и, как только оно достигает насыщения, контроллер вводит программный запрет интегрирования для интегральной составляющей.

3. Фильтр. Поскольку максимальное значение входного воздействия на объект управления снижается с уменьшением разности между уставкой и выходом, то для устранения эффекта ограничения можно снизить скорость нарастания сигнала уставки с помощью фильтра. Недостатками такого способа являются снижение быстродействия системы, а также невозможность устранить интегральное насыщение, вызванное внешними возмущениями, а не сигналом задания.

Нечеткий регулятор обладает большим потенциалом для реализации различного рода алгоритмов управления, и потому предлагается компенсировать интегральное насыщение за счёт использования внутреннего функционала регулятора, который предстоит разработать. Это является будущим направлением для исследования.

Заключение

В результате данной работы был произведен синтез двух типов регуляторов – классического и нечеткого для САР расхода жидкости между двумя технологическими емкостями. Для синтеза нечеткого регулятора была разработана методика синтеза параметров функций принадлежности, основанная на использовании известных коэффициентов ПИД-регулятора.

Кроме того, чтобы сократить время переходного процесса и тем самым увеличить качество управления для нечеткого регулятора, была проведена модернизация разработанного алгоритма управления. Работа двух типов регуляторов была промоделирована в среде разработки LabView. Результат моделирования был представлен в виде графиков расхода, проанализировав которые, можно сделать вывод о том, что нечеткий регулятор, построенный по предложенной методике, не уступает в качестве управления классическому ПИД-регулятору и может быть использован в реальных системах регулирования. Оправданным является использование ПИД-подобных регуляторов, если локальный регулятор является подсистемой сложной комплексной системы, управляемой при помощи нечеткой логики.

В рамках данной работы был исследован, но не решен вопрос компенсации интегрального насыщения для ПИД-подобного нечеткого

регулятора в отличие от классического ПИД-регулятора. Это является направлением дальнейшего исследования для разработки соответствующего алгоритма управления.

Библиографический список

1. Курской Ю.С. Особенности измерений в реальных динамических системах // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2013. – № 4(100). – С. 64–71.
2. Павловская О.О. Теория автоматического управления. Ч.2: Нелинейные системы: учеб. пособие. – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ. – 2011. – С. 90.
3. Wescott T. PID Without a PhD // Wescott Design Services. – 2009. – P. 29.
4. Чернецкая И.В., Чернецкий В.О. Нечеткие регуляторы в системах автоматического регулирования // Вестник ЮУрГУ. Сер. Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2006. – № 14(69). – С. 156–159.
5. Цветков В.Я. Сложные технические системы // Образовательные ресурсы и технологии. – 2017. – № 3(20). – С. 86–91.
6. Costa, Bruno & Costa, J & Bezerra, Clauber & Guedes, Luiz Affonso & Oliveira, H. Java fuzzy logic toolbox for industrial process control // XVIII Congresso Brasileiro de Automática. – 2010. – P. 207–214.
7. Ignatyev Vladimir & Finaev V.I. The use of hybrid regulator in design of control systems // World Applied Sciences Journal. – 2013. – № 23. – P. 1291–1297. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.23.10.13144
8. Ahmed M. Ahmed., Amr Ali-Eldin, Mohamed S. Elksasy, Faiz F. Areed. Brushless DC Motor Speed Control using both PI Controller and Fuzzy PI Controller // International Journal of Computer Applications. – 2015. – № 109. – P. 29–35. DOI: 10.5120/19227-0933
9. Nnochiri U. Comparison Study between Fuzzy Logic Controller (FLC) and Proportional-IntegralDerivative (PID) in Controlling of Liquid Flow // International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR). – 2014. – № 2.
10. Sabri, Laith & Al-mshat, Hussein. Implementation of Fuzzy and PID Controller to Water Level System using LabView // International Journal of Computer Applications. – 2015. – № 116. – P. 6–10. DOI: 10.5120/20378-2599

11. Хижняков Ю.Н. Алгоритмы нечеткого, нейронного и нейро-нечеткого управления в системах реального времени: учеб. пособие. Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2013.

12. Пенской И.С., Рогозин О.В. Нейронечеткий ПИД-регулятор в задаче угловой стабилизации мультироторного БПЛА // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. – 2018. – № 21. – С. 320–327.

13. Первушина Н.А., Доновский Д.Е., Хакимова А.Н. Разработка методики синтеза нейронечеткого регулятора с настройкой генетическим алгоритмом // Фундаментальные исследования. – 2018. – № 4(27). – С. 82–90.

14. Мунасыпов Р.А., Ахмеров К.А. Методика оптимизации нечеткого регулятора с помощью генетических алгоритмов // Фундаментальные исследования. – 2015 – № 2–15. – С. 3275–3280.

15. Дивеев А.И., Пупков К.А., Софронова Е.А. Синтез системы управления – задача тысячелетия // Вестник РУДН. Сер. Инженерные исследования. – 2011. – № 2. – С. 113–124.

16. Гаджиев Ф.Г. Об одном подходе к построению и аппроксимации функций принадлежности // Universum: технические науки. – 2018. – № 5(50).

17. Есилевский В.С., Кузнецов В.Н., Уварова Л.В. Минимизация энергозатрат на управление насосными станциями путем использования регуляторов с нечеткой логикой // Сантехника. Водоснабжение. Водоотведение. – 2009. – № 1. – С. 64–70.

18. Система нечетко-нейронного управления канализационной насосной станцией с использованием генетических алгоритмов / В.Н. Кузнецов, В.С. Есилевский, С.В. Дядюн, А.В. Белогурова // Sciencerise. – 2015. – Т. 6, № 2(11). – С. 26–29.

19. Даденков Д.А., Шиляев Д.В. Сравнительный анализ методов синтеза систем регулирования скорости микроприводов постоянного тока // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2013. – № 7. – С. 74–82.

20. Колесников В.Л., Бракович А.И., Жук Я.А. Фазификация и дефазификация данных при решении многокритериальных задач // Труды БГТУ. Сер. 3. Физико-математические науки и информатика. – 2014. – № 6(170). – С. 125–127.

21. Простой регулятор на базе нечеткой логики. Создание и настройка: petuhoff. – 7 июня 2018, 17:21. – URL: <https://habr.com/ru/post/413539/>
22. Бурцев М.В., Поворознюк А.И. Выбор функций принадлежности для описания симптомокомплексов в комбинированном решающем правиле // Вестник НТУ ХПИ. – 2010. – № 31. – С. 10–15.
23. Носов Г.В., Колчанова В.А., Кулешова Е.О. Теоретические основы электротехники: учеб. пособие. Ч. 2 // Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2012. – С. 202.
24. Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации // СТА. – 2007. – № 4. – С. 86–97.
25. Astrom K.J., Hagglund T. Advanced PID control // The Instrumentation, Systems, and Automation Society. – 2006.
26. Олсон Г., Пиани Д. Цифровые системы автоматизации и управления. – СПб.: Невский диалект, 2001. – 557 с.
27. Visioli A. Practical PID Control. – Springer. – 2006. – P. 314.

References

1. Kurskoi Iu.S. Osobennosti izmerenii v real'nykh dinamicheskikh sistemakh [Features of measurements in real dynamic systems]. *Energoberezhnie. Energetika. Energoaudit*, 2013, no. 4(100), pp. 64-71.
2. Pavlovskaja O.O. Teoriia avtomaticheskogo upravleniia. Chast' 2. Nelineinye sistemy [Automatic control theory. Part 2. Nonlinear systems]. Cheliabinsk: Iuzhno-Ural'skii gosudarstvennyi universitet, 2011, 90 p.
3. Wescott T. PID Without a PhD. *Wescott Design Services*, 2009, 29 p.
4. Chernetskaia I.V., Chernetskii V.O. Nechetkie regulatory v sistemakh avtomaticheskogo regulirovaniia [Fuzzy controllers in automatic control systems]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Komp'iuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika*, 2006, no. 14(69), pp. 156-159.
5. Tsvetkov V.Ia. Slozhnye tekhnicheskie sistemy [Complex technical systems]. *Obrazovatel'nye resursy i tekhnologii*, 2017, no. 3(20), pp. 86-91.
6. Costa, Bruno & Costa, J & Bezerra, Clauber & Guedes, Luiz Affonso & Oliveira, H. Java fuzzy logic toolbox for industrial process control. *XVIII Congresso Brasileiro de Automática*, 2010, pp. 207-214.
7. Ignatyev Vladimir & Finaev V.I. The use of hybrid regulator in design of control systems. *World Applied Sciences Journal*, 2013, no. 23, pp. 1291-1297. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.23.10.13144

8. Ahmed M. Ahmed., Amr Ali-Eldin, Mohamed S. Elksasy, Faiz F. Areed. Brushless DC Motor Speed Control using both PI Controller and Fuzzy PI Controller. *International Journal of Computer Applications*, 2015, no. 109, pp. 29-35. DOI: 10.5120/19227-0933

9. Nnochiri U. Comparison Study between Fuzzy Logic Controller (FLC) and Proportional-IntegralDerivative (PID) in Controlling of Liquid Flow. *International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR)*, 2014, no. 2.

10. Sabri, Laith & Al-mshat, Hussein. Implementation of Fuzzy and PID Controller to Water Level System using LabView. *International Journal of Computer Applications*, 2015, no. 116, pp. 6-10. DOI: 10.5120/20378-2599

11. Khizhniakov Iu.N. Algoritmy nechetkogo, neironnogo i neuro-nechetkogo upravleniia v sistemakh real'nogo vremeni [Algorithms of fuzzy, neural and neuro-fuzzy control in real-time systems]. Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2013.

12. Penskoii I.S., Rogozin O.V. Neironechetkii PID-regulator v zadache uglovoi stabilizatsii mul'tirotnogo BPLA [Neural fuzzy PID controller in the problem of angular stabilization of a multi-rotor UAV]. *Novye informatsionnye tekhnologii v avtomatizirovannykh sistemakh*, 2018, no. 21, pp. 320-327.

13. Pervushina N.A., Donovskii D.E., Khakimova A.N. Razrabotka metodiki sinteza neironechetkogo reguliatora s nastroikoii geneticheskim algoritmom [Development of a synthesis technique for a neuro-fuzzy controller with tuning by a genetic algorithm]. *Fundamental'nye issledovaniia*, 2018, no. 4(27), pp. 82-90.

14. Munasypov R.A., Akhmerov K.A. Metodika optimizatsii nechetkogo reguliatora s pomoshch'iu geneticheskikh algoritmov [Fuzzy controller optimization technique using genetic algorithms]. *Fundamental'nye issledovaniia*, 2015, no. 2-15, pp. 3275-3280.

15. Diveev A.I., Pupkov K.A., Sofronova E.A. Sintez sistemy upravleniia - zadacha tysiacheletii [Synthesis of the control system is the Millennium Challenge]. *Vestnik Rossiiskogo universiteta druzhby narodov. Inzhenernye issledovaniia*, 2011, no. 2, pp. 113-124.

16. Gadzhiev F.G. Ob odnom podkhode k postroeniiu i approksimatsii funktsii prinadlezhnosti [About one approach to the construction and approximation of membership functions]. *Universum: tekhnicheskie nauki*, 2018, no. 5(50).

17. Esilevskii V.S., Kuznetsov V.N., Uvarova L.V. Minimizatsiia energozatrat na upravlenie nasosnymi stantsiiami putem ispol'zovaniia regulatorov s nechetkoi logikoi [Minimization of energy consumption for control of pumping stations by using fuzzy logic controllers]. *Santekhnika. Vodosnabzhenie. Vodootvedenie*, 2009, no. 1, pp. 64-70.

18. Kuznetsov V.N., Esilevskii V.S., Diadiun S.V., Belogurova A.V. Sistema nechetko-neironnogo upravleniia kanalizatsionnoi nasosnoi stantsiei s ispol'zovaniem geneticheskikh algoritmov [Fuzzy neural control system for a sewage pumping station using genetic algorithms]. *Sciencerise*, 2015, vol. 6, no. 2(11), pp. 26-29.

19. Dadenkov D.A., Shiliaev D.V. Sravnitel'nyi analiz metodov sinteza sistem regulirovaniia skorosti mikroprivodov postoiannogo toka [Comparative analysis of synthesis methods for speed control systems of micro DC drives]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2013, no. 7, pp. 74-82.

20. Kolesnikov V.L., Brakovich A.I., Zhuk Ia.A. Fazifikatsiia i defazifikatsiia dannykh pri reshenii mnogokriterial'nykh zadach [Fuzzification and defuzzification data for solving multicriteria problems]. *Trudy Belorusskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Fiziko-matematicheskie nauki i informatika*, 2014, no. 6(170), pp. 125-127.

21. Prostoi regulator na baze nechetkoi logiki. Sozdanie i nastroyka: petuhoff [A simple fuzzy logic controller. Creation and configuration: petuhoff]. 7 June 2018, 17:21, available at: <https://habr.com/ru/post/413539/>

22. Burtsev M.V., Povorozniuk A.I. Vybor funktsii prinadlezhnosti dlia opisaniia simptomokompleksov v kombinirovannom reshaiushchem pravile [The choice of membership functions for the description of symptom complexes in the combined decision rule]. *Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta «Khar'kovskii politekhnicheskii institut»*, 2010, no. 31, pp. 10-15.

23. Nosov G.V., Kolchanova V.A., Kuleshova E.O. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Chast' 2 [Theoretical foundations of electrical engineering. Part 2]. *Natsional'nyi issledovatel'skii Tomskii politekhnicheskii universitet. Tomsk: Tomskii politekhnicheskii universitet*, 2012, 202 p.

24. Denisenko V.V. PID-regulirovaniye: voprosy realizatsii [PID Controllers: Implementation Issues]. *STA*, 2007, no. 4, pp. 86-97.

25. Astrom K.J., Hagglund T. Advanced PID control. *The Instrumentation, Systems, and Automation Society*, 2006.

26. Olson G., Piani D. Tsifrovye sistemy avtomatizatsii i upravleniia [Digital automation and control systems]. Saint Petersburg: Nevskii dialekt, 2001, 557 p.

27. Visioli A. Practical PID Control. *Springer*, 2006, 314 p.

Сведения об авторах

Шмидт Игорь Альбертович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: shmidt-ia@yandex.ru).

Калинин Иван Алексеевич (Пермь, Россия) – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: iv.kalinin1990@yandex.ru).

Пономарева Наталья Александровна – студентка Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ttnpnm@yandex.ru).

About the authors

Igor A. Schmidt (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Microprocessor automation tools Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: shmidt@msa.pstu.ac.ru).

Ivan A. Kalinin (Perm, Russian Federation) – Student Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: iv.kalinin1990@yandex.ru).

Natalia A. Ponomareva (Perm, Russian Federation) – Student Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: ttnpnm@yandex.ru).

Получено 01.03.2021