

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

УДК 681.51:621.646.4:622.691.4.053
DOI 10.21685/2072-3059-2019-1-5

В. В. Крюков, В. В. Тугов

УПРАВЛЕНИЕ РЕДУЦИРОВАНИЕМ ГАЗА В МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДАХ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ АППАРАТА НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Аннотация.

Актуальность и цели. Предложен новый подход к разработке системы управления клапаном – регулятором высокого давления с применением аппарата нечеткой логики. Описывается разработанный алгоритм управления клапаном в SCADA-модуле на встроенном языке ST, который позволяет более качественно управлять технологическим процессом редуцирования давления газа.

Материалы и методы. Для решения поставленной задачи использовались методы теории управления, в частности, теории регулирования, основанной на нечеткой логике. Разработана математическая модель процесса редуцирования давления газа в магистральном газопроводе с переменным режимом работы с применением нечеткого регулятора.

Результаты. Произведено математическое описание процесса редуцирования газа, основанное на методе нечеткой логики, а также разработан алгоритм управления клапаном на языке ST (структурированного текста).

Выводы. Использование данного алгоритма управления на базе нечеткой логики позволяет учитывать накопленный опыт специалистов, что позволяет более качественно управлять технологическим процессом, в отличие от ПИД-регулирования, и, как следствие, не требует постоянной настройки коэффициентов ПИД-регулятора.

Ключевые слова: давление, редуцирование газа, алгоритм, управление, нечеткая логика.

V. V. Kryukov, V. V. Tugov

GAS REDUCTION MANAGEMENT IN HIGH-PRESSURE GAS MAINS WITH THE USE OF FUZZY LOGIC APPARATUS

© Крюков В. В., Тугов В. В., 2019. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

Abstract.

Backgrounds. The article suggests a new approach to the development of valve control systems - a high-pressure regulator using fuzzy logic devices. The developed algorithm of valve control in the SCADA-module in the built-in ST language is described, which allows to better control the technological regime of gas pressure reduction.

Materials and methods. To solve this problem, the article used methods of control theory, in particular, control theory based on fuzzy logic. A mathematical model of the process of reducing gas pressure in a gas pipeline with a variable mode of operation using a fuzzy regulator was developed.

Results. A mathematical description of the gas reduction process based on the fuzzy logic method has been made, as well as the valve control algorithm in the ST language (structured text) has been developed.

Conclusions. Using this control algorithm based on fuzzy logic allows you to take into account the accumulated experience of specialists, which allows you to better manage the process, in contrast to the PID control, and as a result, does not require constant adjustment of the PID controller coefficients.

Keywords: pressure, gas reduction, algorithm, control, fuzzy logic.

Введение

Важнейшая задача предприятий газотранспортной системы – это безаварийное функционирование оборудования магистральных газопроводов. Одним из основных элементов линейной части газопровода является узел редуцирования газа. Он предназначен для понижения давления газа до заданного с целью его перепуска из газопроводов с различными характеристиками рабочего давления. Осуществляется этот процесс регулирующим клапаном. Именно от правильности его настройки в дальнейшем зависит работа всего магистрального газопровода [1].

Как правило, клапан регулируется по пропорционально-интегральному/дифференциальному (ПИД) закону. Опыт эксплуатации показывает, что настройка ПИД-регуляторов, как правило, очень сложна и трудоемка. Она включает в себя решение сложных систем дифференциальных уравнений, что не всегда дает положительный результат. Также из-за переменного режима работы газопровода требуется постоянная настройка коэффициентов ПИД-регулятора, а поэтому необходимо наличие на объекте обслуживающего персонала. Все это ведет к возникновению автоколебания, перерегулированию в системе и, как следствие, отклонению давления от заданного значения, а также к быстрому износу механических подвижных деталей регулирующего органа (клапана), таких как седло клапана, уплотнения, штоки, поршень и т.д. [2].

Из-за этого возникают различные аварийные ситуации, а при превышении максимально допустимого значения давления и некорректной отработки специального пружинного предохранительного клапана (СППК) возможен разрыв газопровода [1]. Отсюда возникают срывы режима подачи газа потребителям, ремонтно-восстановительные работы и, как следствие, временные и финансовые затраты.

Однако в последнее время все большее внимание в науке и практике уделяется новому принципу построения регуляторов, основанному на базе

правил нечеткой логики (fuzzy logic). Данный принцип соединяет в себе такие преимущества, как точность цифрового управления и существующий опыт специалистов [3–5]. Для реализации регулятора на базе нечеткой логики необходимо определить входные лингвистические переменные, лингвистическую переменную, которую необходимо получить, а также правила образования результирующего воздействия из входных переменных. В итоге возможно определять необходимые значения, такие как мощность, обороты, положение заслонки и т.д.

1. Математическое описание процесса редуцирования газа на магистральном газопроводе с применением аппарата нечеткой логики

Рассмотрим процесс редуцирования газа на реальном объекте узла редуцирования Оренбургского линейного производственного управления магистральных газопроводов. Клапан-регулятор установлен на узле редуцирования газа, служащего для понижения давления из газопровода № 1 Ду 1200 Ру 75 кг/см² в газопровод № 2 Ду 1000 Ру 50 кг/см². Система управления включает микропроцессоры (линейная телемеханика с процессорным модулем AMD® Elan™ SC520 и набором плат ввода-вывода). Разработаем алгоритм и правила нечеткой логики, которые позволят регулировать давление в газопроводе «после себя» путем перемещения поршня в сепараторе клапана (рис. 1).

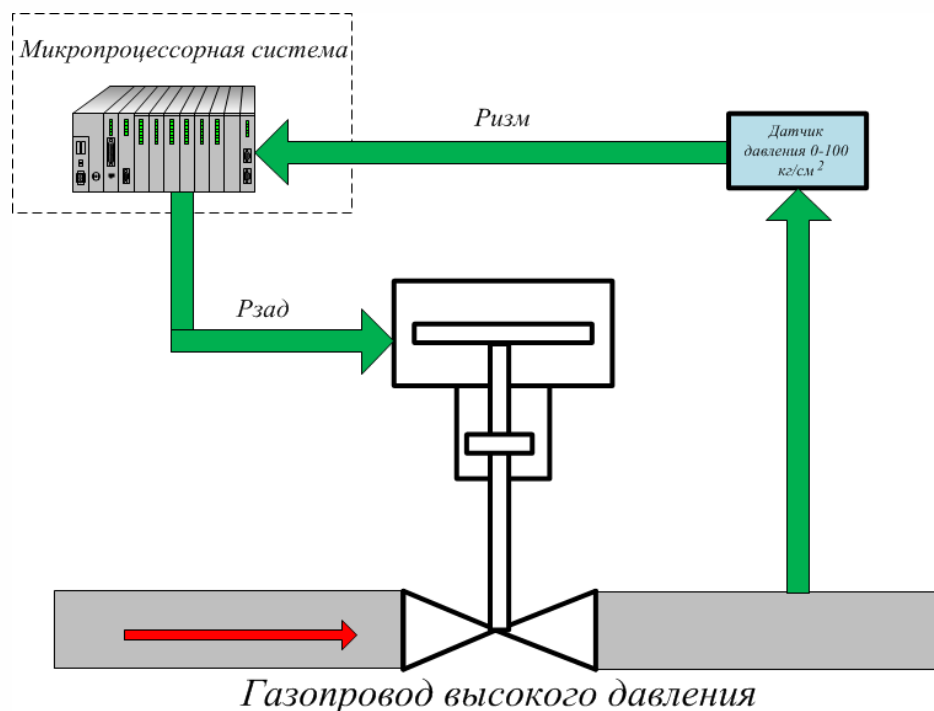
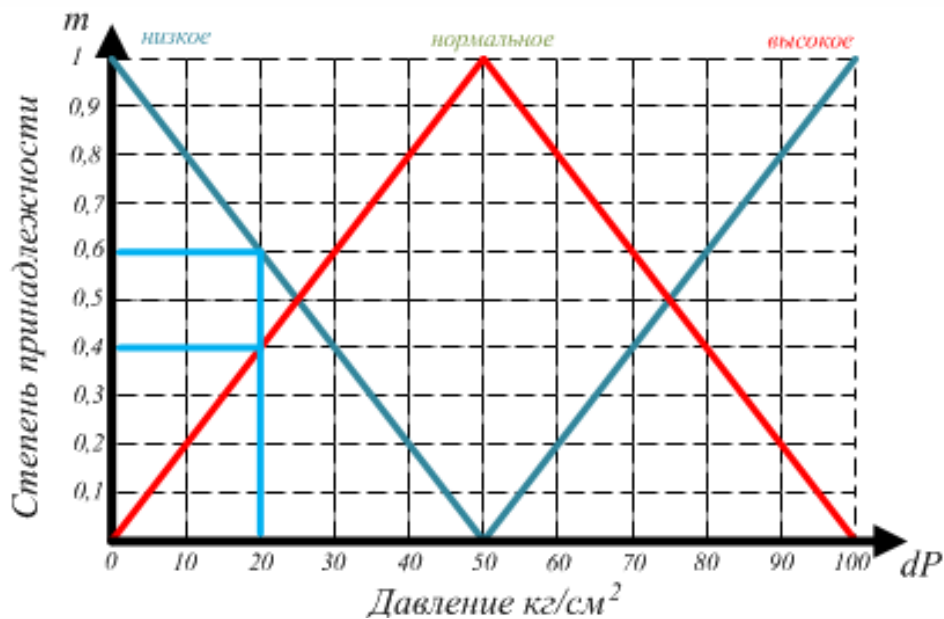


Рис. 1. Технологическая схема регулирования давления

Функции принадлежности сигналов вход-выход, а также правила принятия решений о ходе технологического процесса формируются на основе опыта диспетчера и обслуживающего персонала.

Значение давления $P_{изм}$ определяется датчиком, который устанавливается после клапана-регулятора, с диапазоном измерения от 0 до 100 кг/см².

Предположим, что значение текущего давления равно 55 кг/см². Заданное давление $P_{зад}$ примем равным 50 кг/см². Данное значение находится в середине диапазона измерения. Тогда отклонение текущего давления dP от заданной уставки (ошибка регулирования), находится в диапазоне от минус 50 до плюс 50 кг/см². Для фазификации по величине отклонения давления газа в трубопроводе примем треугольную форму функций принадлежности трех термов (рис. 2).



М – давление ниже нормы; Н – давление норма; В – давление выше нормы

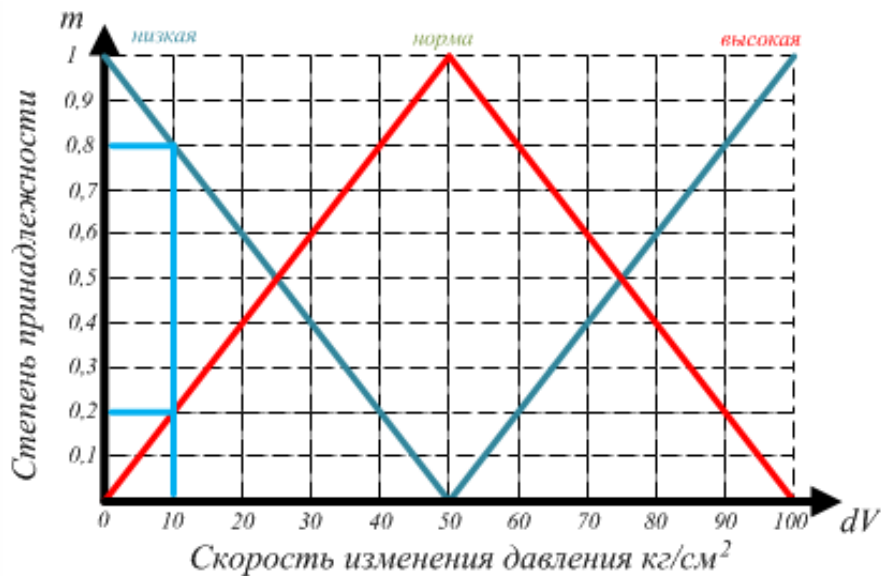
Рис. 2. Форма функции принадлежности изменения давления

Чтобы повысить точность и качество управления процессом, вычислим скорость изменения давления в газопроводе dV , которая может изменяться в пределах значений от -50 до $+50$ кг/см². Для фазификации скорости изменения давления в газопроводе примем аналогичную форму функций принадлежности (рис. 3).

Для регулирования с помощью открытия-закрытия клапана-регулятора используем сигнал задания положения клапана $I_{зад}$, который поступает с выхода модуля микропроцессорной системы управления. Формированием управляющего сигнала обеспечивается изменение положения клапана регулятора L , которое определяется диапазоном от 0 до 100 %. Управление Положением клапана в лингвистических переменных нечеткой логики может быть представлено пятью термами (рис. 4).

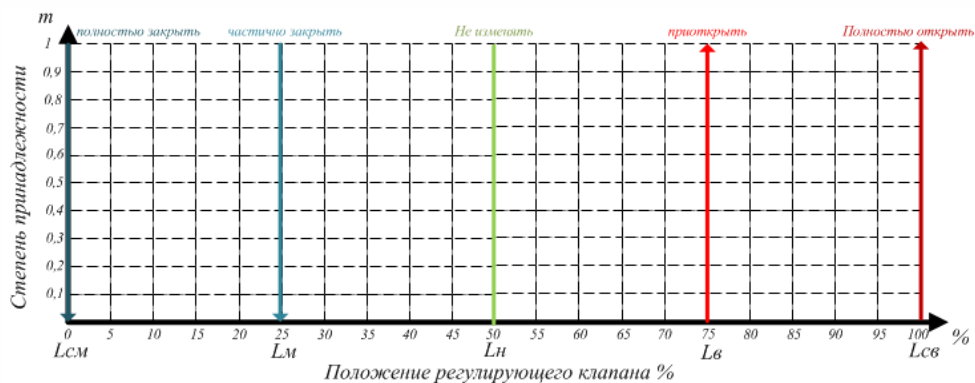
Если давление меньше уставки и его значение не изменяется, то клапан частично открываем. Через нечеткие переменные это правило запишем следующим образом:

$$\text{если } dP = \text{М и } dV = \text{Н, то } L = \text{В.}$$



M – скорость ниже нормы; H – скорость норма; B – скорость выше нормы

Рис. 3. Функция принадлежности изменения скорости давления



СМ – закрыть клапан; М – частично закрыть клапан; Н – не изменять положение;
В – частично открыть клапан; СВ – открыть клапан полностью.

Рис. 4. Лингвистические переменные открытия клапана

Если давление меньше уставки и его значение уменьшается, то клапан полностью открываем. Через нечеткие переменные это правило можно представить следующим образом:

$$\text{если } dP = M \text{ и } dV = M, \text{ то } L = СВ.$$

Если давление больше уставки и его значение не изменяется, то клапан частично закрываем. Через нечеткие переменные это правило представим следующим образом:

$$\text{если } dP = B \text{ и } dV = H, \text{ то } L = H.$$

Если давление больше уставки и его значение увеличивается, то клапан полностью закрываем. Через нечеткие переменные это правило можно представить так:

если $dP = В$ и $dV = В$, то $L = СВ$.

Аналогично составляем остальные правила. Если проанализировать все возможные состояния вышеперечисленных условий, то для данного случая можно составить девять правил. Совокупность всех правил удобно представить в виде таблицы (табл. 1).

Таблица 1

Совокупность условий управления

Правило	Изменение давления	Скорость изменения давления	Возмущающее воздействие на клапан
1	В ↑	М ↓	Н
2	В ↑	Н	М ↓
3	В ↑	В ↑	СМ ↓↓
4	Н	М ↓	В ↑
5	Н	Н	Н
6	Н	В ↑	М ↓
7	М ↓	М ↓	СВ ↑↑
8	М ↓	Н	В ↑
9	М ↓	В ↑	Н

В качестве метода дефазификации данных используем метод центра тяжести.

Рассмотрим, как вычисляется управляющее воздействие в произвольной точке движения системы.

Пусть отклонение давления составляет 30 кг/см^2 и оно продолжает снижаться со скоростью 10 кг/см^2 . В данном случае термы М и Н отклонения давления имеют степень принадлежности $0,6$ и $0,4$ соответственно (рис. 2), а термы М и Н скорости изменения давления соответственно $0,8$ и $0,2$ (рис. 3). Степень принадлежности к остальным термам равна 0 . Для принятой формы записи правил степень принадлежности antecedента каждого правила определяется по минимуму всех условий, т.е. для вывода имеют значения правила, содержащие условия с ненулевыми степенями принадлежности:

1. Если $dP = М$ и $dV = М$, то $L = СВ$.
2. Если $dP = М$ и $dV = Н$, то $L = В$.
3. Если $dP = Н$ и $dV = М$, то $L = В$.
4. Если $dP = Н$ и $dV = Н$, то $L = Н$.

Каждое из этих правил дает степень принадлежности выводу по минимуму:

1. $M_{СВ}(L) = \min \{m_M(dP); m_M(dV)\} = \min \{0,6; 0,8\} = 0,6$.
2. $M_B(L) = \min \{m_M(dP); m_H(dV)\} = \min \{0,6; 0,2\} = 0,2$.
3. $M_B(L) = \min \{m_H(dP); m_M(dV)\} = \min \{0,4; 0,8\} = 0,4$.
4. $M_H(L) = \min \{m_H(dP); m_H(dV)\} = \min \{0,4; 0,2\} = 0,2$.

На втором этапе формирования нечеткого вывода определим степень принадлежности термов выходной переменной по максимальному значению. Например, выражения п. 2 и 3 дают различные значения степени принадлежности для терма Мв, но берется максимальное из них:

1. $M_B(L) = \max \{m_B(L); m_B(L)\} = \max \{0,2; 0,4\} = 0,4$.

Таким образом, при данном состоянии входных сигналов степени принадлежности термов выходной переменной имеют значения (рис. 4):

$$\{m_{cm}, m_m, m_n, m_v, m_{cv}\} = \{0; 0; 0,2; 0,4; 0,6\}.$$

Для перехода от нечетких выводов к управляющему воздействию на клапан используем формулу дефазификации по методу центра тяжести:

$$L_{зад} = (L_{cm}m_{cm} + L_m m_m + L_n m_n + L_v m_v + L_{cv} m_{cv}) / (m_{cm} + m_m + m_n + m_v + m_{cv})$$

Подставив в формулу численные значения, получим

$$L = (0 \cdot 0 + 25 \cdot 0 + 50 \cdot 0,2 + 75 \cdot 0,4 + 100 \cdot 0,6) / (0 + 0 + 0,6 + 0,4 + 0,2) = 83,3 \%$$

Таким образом, чтобы поддержать требуемую уставку давления, клапан необходимо открыть на 83,3 %, следовательно

$$I_{зад} = (83,3 \cdot 16) / 100 + 4 = 17,33 \text{ мА}.$$

2. Программная реализация алгоритма управления клапаном на базе нечеткой логики

Рассмотрим практическую реализацию разработанного алгоритма и правил нечеткой логики на узле редуцирования газа под управлением системы линейной телемеханики «Магистраль 2». Для этого в конфигураторе Zond Data Base создадим две базы данных:

1. База данных непосредственно объекта управления (полевой уровень).
2. База данных диспетчерского пункта (Верхний уровень АСУТП предприятия).

Затем в конфигураторе зададим входные и выходные порты баз данных, их параметры, протокол связи модулей ввода-вывода, а также тип данных и параметры линии. Для реализации обмена информацией между модулями ввода-вывода и процессорным модулем используется промышленный протокол Modbus RTU. На аппаратном уровне связь организована при помощи двухпроводного интерфейса RS-485, работающего в полудуплексном режиме [6–8].

Для реализации управления был создан репер параметра – сигнал задания процента открытия клапана регулятора и привязан к модулю вывода аналогового сигнала 4–20 мА. Согласно карте Modbus регистров на модуле управления были заданы следующие параметры: Modbus адрес устройства, Тип Modbus – Holding, адрес регистра чтения/записи. По аналогии были созданы репера параметров «задание уставки», «давление после клапана-регулятора» и «положение клапана-регулятора».

Для написания алгоритма управления на основе нечеткой логики использован встроенный язык программирования ST (язык структурированного текста). Фрагмент алгоритма представлен на рис. 5.

На рис. 6, 7 представлен сравнительный анализ графика работы системы регулирования газа.

Заключение

Использование данного алгоритма управления на базе нечеткой логики, как видно из рис. 6, позволяет более качественно управлять процессом регулирования, в отличие от традиционного ПИД-регулирования.

```

FUNC Scorost_Menshe(x,P_zad) ; функция принадлежности к терму "скорость изменения давления уменьшается"
if LT(x,0)
result=x*(-1/Opred_Plecha(P_zad))
else
result=0
endif
return(result)
endfunc

FUNC Scorost_Norma(x,P_zad) ; функция принадлежности к терму "скорость изменения давления не изменяется"
if LT(x,0)
result=x*(1/Opred_Plecha(P_zad))+1
else
result=x*(-1/Opred_Plecha(P_zad))+1
endif
return(result)
endfunc

FUNC Scorost_Bolshe(x,P_zad) ; функция принадлежности к терму "скорость изменения давления увеличивается"
if GT(x,0)
result=x*(1/Opred_Plecha(P_zad))
else
result=0
endif
return(result)
endfunc

FUNC Proc_Otkr(P_zad,P_izm,V_izm) ; функция "процент открытия", дефазификация по методу центра тяжести
CM=MIN(Davlenie_Bolshe(P_izm-P_zad,P_zad),Scorost_Bolshe(V_izm,P_zad))
M=MAX(min(Davlenie_Norma(P_izm-P_zad,P_zad),Scorost_Bolshe(V_izm,P_zad)),
min(Davlenie_Bolshe(P_izm-P_zad,P_zad),Scorost_Norma(V_izm,P_zad)))
H=NMAX(min(Davlenie_Menshe(P_izm-P_zad,P_zad),Scorost_Bolshe(V_izm,P_zad)),
min(Davlenie_Norma(P_izm-P_zad,P_zad),Scorost_Norma(V_izm,P_zad)))
B=MIN(Davlenie_Bolshe(P_izm-P_zad,P_zad),Scorost_Menshe(V_izm,P_zad))
B=NMAX(min(Davlenie_Menshe(P_izm-P_zad,P_zad),Scorost_Norma(V_izm,P_zad)),
min(Davlenie_Norma(P_izm-P_zad,P_zad),Scorost_Menshe(V_izm,P_zad)))
CB=MIN(Davlenie_Menshe(P_izm-P_zad,P_zad),Scorost_Menshe(V_izm,P_zad))
result=(CM*CM_ust+M*M_ust+H*H_ust+B*B_ust+CB*CB_ust)/(CM+M+H+B+CB)
return(result)
endfunc

```

Рис. 5. Фрагмент кода программы

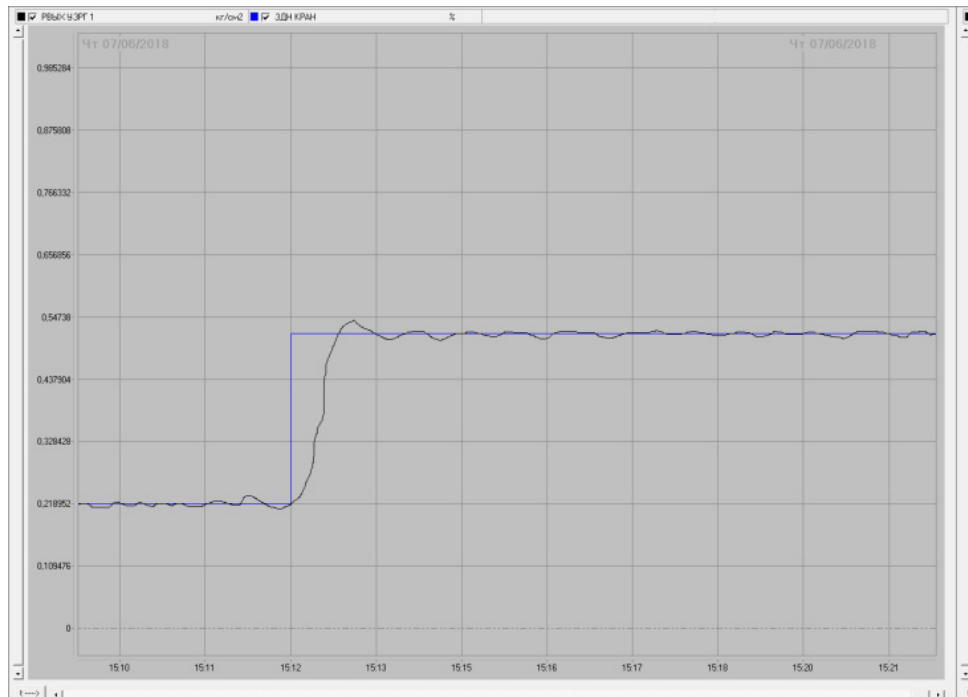


Рис. 6. Сравнительный анализ работы системы регулирования ПИД-регулятора

Во-первых, алгоритм позволяет лучше подстроиться под переменный режим работы газопровода и не требует постоянного подбора коэффициентов

ПИД-регулятора. Во-вторых, увеличивает срок службы клапана в связи с минимальным воздействием на его механическую часть, а главное – сводит к минимуму возникновение внештатных ситуаций на объекте.

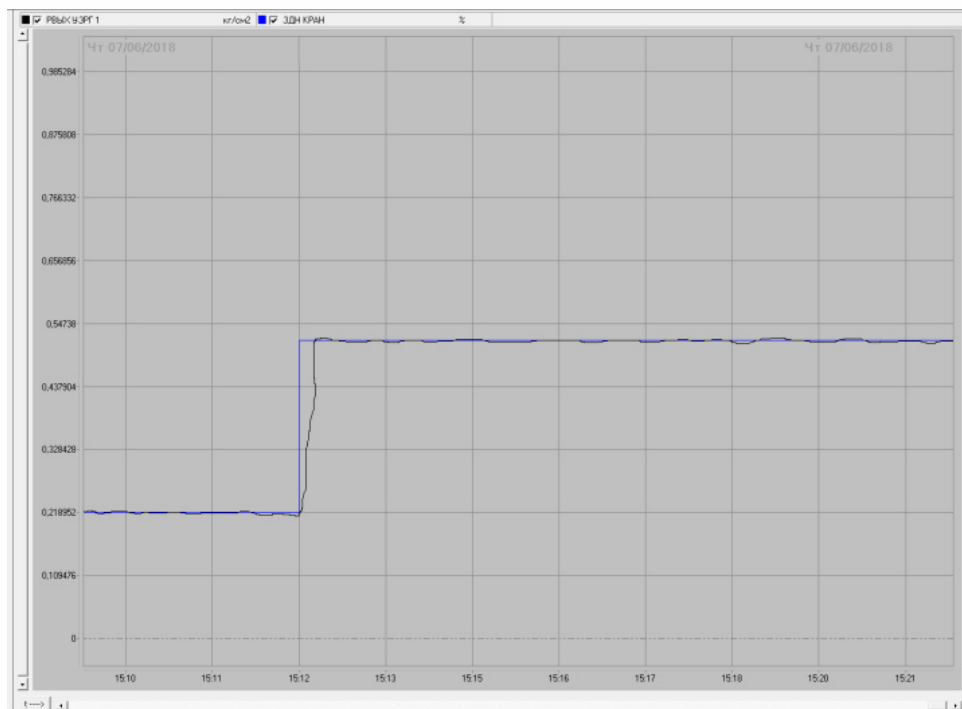


Рис. 7. Сравнительный анализ работы системы регулирования регулятора с применением аппарата нечеткой логики

Подводя итог, можно сказать, что у нечетких систем регулирования возможности значительно шире, чем у традиционных ПИД-регуляторов.

Библиографический список

1. **Козаченко, А. Н.** Эксплуатация компрессорных станций магистральных газопроводов / А. Н. Козаченко. – Москва : Нефть и газ, 1999. – 463 с.
2. Трубопроводная арматура с автоматическим управлением : справочник / Д. Ф. Гуревич, О. Н. Заринский, С. И. Косых и др. ; под общ. ред. С. И. Косых. – Ленинград : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. – 320 с.
3. **Гостев, В. И.** Проектирование нечетких регуляторов для систем автоматического управления / В. И. Гостев. – Москва : БХВ-Петербург, 2011. – 416 с.
4. **Чурсин, К. А.** Нечеткая система регулирования расхода реагента для обессоливания воды с использованием нечеткой логики / К. А. Чурсин, В. В. Тугов // Компьютерная интеграция производства и ИПИ-технологии : материалы VII Всерос. науч.-практ. конф. – Оренбург, 2015. – С. 111–114.
5. **Гневшев, И. В.** Разработка модели процесса очистки воды на основе аппарата нечеткой логики / И. В. Гневшев, В. В. Тугов // Компьютерная интеграция производства и ИПИ-технологии : материалы VII Всерос. науч.-практ. конф. – Оренбург, 2015. – С. 50–53.
6. **Бураков, М. В.** Нечеткие регуляторы : учеб. пособие / М. В. Бураков. – Санкт-Петербург : Из-во ГУАП, 2010. – 237 с.

7. **Денисенко, В. В.** Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием / В. В. Денисенко. – Москва : Горячая линия-Телеком, 2009. – 608 с.
8. **Крюков, В. В.** Применение нечеткой логики в процессе управления редуцированием газа в магистральных трубопроводах / В. В. Крюков // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика (InnoTech 2017) : материалы IX Международ. интернет-конф. молодых ученых, аспирантов и студентов. – Пермь : Изд-во Перм. нац. политехн. ун-та, 2017. – С. 122–126.

References

1. Kozachenko A. N. *Ekspluatatsiya kompressornykh stantsiy magistral'nykh gazoprovodov* [Operation of compressor stations of main gas lines]. Moscow: Neft' i gaz, 1999, 463 p. [In Russian]
2. Gurevich D. F., Zarinskiy O. N., Kosykh S. I. et al. *Truboprovodnaya armatura s avtomaticheskim upravleniem: spravochnik* [Automatically controlled valves: reference book]. Leningrad: Mashinostroenie, Leningr. otd-nie, 1982, 320 p. [In Russian]
3. Gostev V. I. *Proektirovanie nechetkikh regulyatorov dlya sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Designing fuzzy regulators for automatic control systems]. Moscow: BKhV-Peterburg, 2011, 416 p. [In Russian]
4. Chursin K. A., Tugov V. V. *Komp'yuternaya integratsiya proizvodstva i IPI-tehnologii: materialy VII Vseros. nauch.-prakt. konf.* [Computer integration of production and IPY-technology: proceedings of VII All-Russian scientific and practical conference]. Orenburg, 2015, pp. 111–114. [In Russian]
5. Gnevshchikov I. V., Tugov V. V. *Komp'yuternaya integratsiya proizvodstva i IPI-tehnologii: materialy VII Vseros. nauch.-prakt. konf.* [Computer integration of production and IPY-technology: proceedings of VII All-Russian scientific and practical conference]. Orenburg, 2015, pp. 50–53. [In Russian]
6. Burakov M. V. *Nechetkie regulatory: ucheb. posobie* [Fuzzy regulators: teaching aid]. Saint-Petersburg: Iz-vo GUAP, 2010, 237 p. [In Russian]
7. Denisenko V. V. *Komp'yuternoe upravlenie tekhnologicheskim protsessom, eksperimentom, oborudovaniem* [Computer control of technological process, experiment, equipment]. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom, 2009, 608 p. [In Russian]
8. Kryukov V. V. *Innovatsionnye tekhnologii: teoriya, instrumenty, praktika (InnoTech 2017): materialy IX Mezhdunar. internet-konf. molodykh uchennykh, aspirantov i studentov* [Innovative technologies: theory, tools, practice (Innotech 2017): proceedings of IX International internet conference of young scientists, postgraduate students and students]. Perm: Izd-vo Perm. nats. politekhn. un-ta, 2017, pp. 122–126. [In Russian]

Крюков Владимир Викторович
аспирант, Оренбургский
государственный университет (Россия,
г. Оренбург, пр. Победы, 13)

E-mail: kryukov56@ Rambler.ru

Тугов Виталий Валерьевич
кандидат технических наук, доцент,
кафедра управления и информатики
в технических системах, Оренбургский
государственный университет
(Россия, г. Оренбург, пр. Победы, 13)

E-mail: sau@mail.osu.ru

Kryukov Vladimir Viktorovich
Postgraduate student, Orenburg State
University (13 Pobedy avenue,
Orenburg, Russia)

Tugov Vitaliy Valer'evich
Candidate of engineering sciences, associate
professor, sub-department of management
and computer science in technical
systems, Orenburg State University
(13 Pobedy avenue, Orenburg, Russia)

Образец цитирования:

Крюков, В. В. Управление редуцированием газа в магистральных газопроводах высокого давления с применением аппарата нечеткой логики / В. В. Крюков, В. В. Тугов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2019. – № 1 (49). – С. 55–65. – DOI 10.21685/2072-3059-2019-1-5.