

УДК 681.51:621.646.4:622.691.4.053

## УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ РЕДУЦИРОВАНИЯ ГАЗА В МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДАХ

**В.В. Крюков, В.В. Тугов**

Оренбургский государственный университет  
Россия, 460018, г. Оренбург, просп. Победы, 13

**Аннотация.** Рассматривается процесс управления редуцированием газа в магистральных газопроводах. Рассмотрен регулирующий клапан высокого давления, который является составной частью узла редуцирования газа. Описан способ управления объектом с использованием классического закона управления, а также критерии, предъявляемые к системе управления. При помощи SCADA комплекса Zond 2006 проведена практическая апробация качества регулирования при различных режимах работы газопровода на реальном объекте управления. Выявлены проблемы и дестабилизирующие факторы, влияющие на качество управления технологическим процессом. Предложен и апробирован метод, основанный на комбинированном подходе, включающий в себя классический закон ПИД-регулирования и процесс адаптации (табличная автонастройка) коэффициентов регулятора под различные режимы работы. Данный метод позволил значительно повысить качество регулирования, а также добиться поддержания заданной уставки при динамически изменяющемся давлении на входе узла редуцирования.

**Ключевые слова:** редуцирование газа, переменный режим работы газопровода, ПИД-регулятор, адаптация, табличная автонастройка, алгоритм, управление.

### Введение

Газовая отрасль Российской Федерации является одним из основных звеньев промышленности. Она включает в себя процессы начиная от добычи газа и заканчивая поставкой его потребителям. Транспортировка газа занимает одну из ведущих ролей. Безаварийная работа трубопроводного транспорта, узлов и агрегатов является основным показателем надежности газотранспортной системы.

Одними из основных звеньев в составе магистральных газопроводов являются узлы редуцирования газа (УРГ). При транспортировке газа по магистральному газопроводу УРГ выполняет функции поддержания заданного давления. Данная функция необходима при перепуске газа между газопроводами с различным максимально разрешенным давлением. Как правило, УРГ высокого давления включает в себя основную и резервную (обводную) линии. На линиях устанавливаются отсечные шаровые краны с блоками управления (БУК), а также регуляторы, на которые возложена основная функция по поддержанию заданного давления (рис. 1). Именно от функционирования данных устройств в целом зависит качество всего производственного процесса [1, 2].

Однако в производственных условиях при работе регуляторов возникают различные проблемы. Основные из них связаны с отсутствием требуемого динамического качества и возникновением автоколебательных процессов, в результа-

---

*Крюков Владимир Викторович, аспирант.*

*Тугов Виталий Валерьевич (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Управление и информатика в технических системах».*

те которых значительно снижается точность регулирования. Все это ведет к преждевременному износу механической части клапана и его неработоспособности, что, как следствие, приводит к возникновению аварийных ситуаций на линейной части магистрального газопровода.

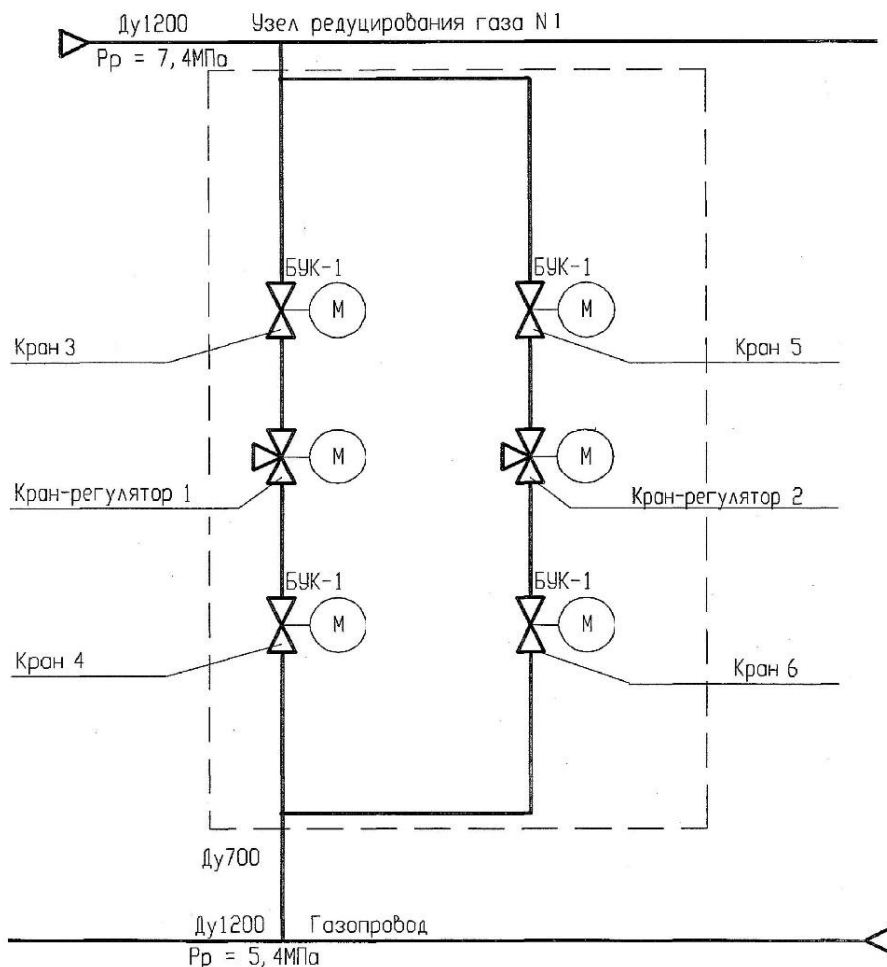


Рис. 1. Технологическая схема узла редуцирования газа

В настоящее время на рынке промышленной автоматизации в качестве системы контроля и управления технологическими процессами широко используются следующие устройства:

- программируемые логические контроллеры (ПЛК);
- промышленные компьютеры;
- сетевой комплекс (plc, network).

Наиболее часто для процесса контроля и управления технологическими параметрами магистрального газопровода используют телемеханические сетевые комплексы. Они состоят из набора контроллеров, объединенных между собой промышленной сетью, реализующих функции телемеханизации технологических узлов магистральной части газопровода, таких как узел редуцирования, узел приема-запуска очистного устройства, узел замера расхода газа и т. д.

Для процесса управления регулирующим клапаном применяется ПЛК (рис. 2). Он представляет собой дискретный автомат с программным управлением, имеющий набор входных и выходных сигналов, к которым подключаются датчики и исполнительные механизмы.

ПЛК контролирует состояние текущих входных параметров, сопоставляет их с заданными условиями (уставкой) и выдает управляющий сигнал на исполнительные механизмы [3].

ПЛК нашли широкое применение в газовой отрасли в связи с тем, что имеют повышенную устойчивость к воздействию окружающей среды, небольшие габариты, модульность и расширяемость, хорошую ремонтпригодность (низкие временные затраты на восстановление работоспособности), флэш-память и наличие сторожевого таймера (который защищает алгоритмы системы управления от зависания). Также неоспоримым достоинством ПЛК является наличие большого числа промышленных интерфейсов, таких как CAN, RS-232, RS-422, RS-485 Ethernet и т. д. [4].

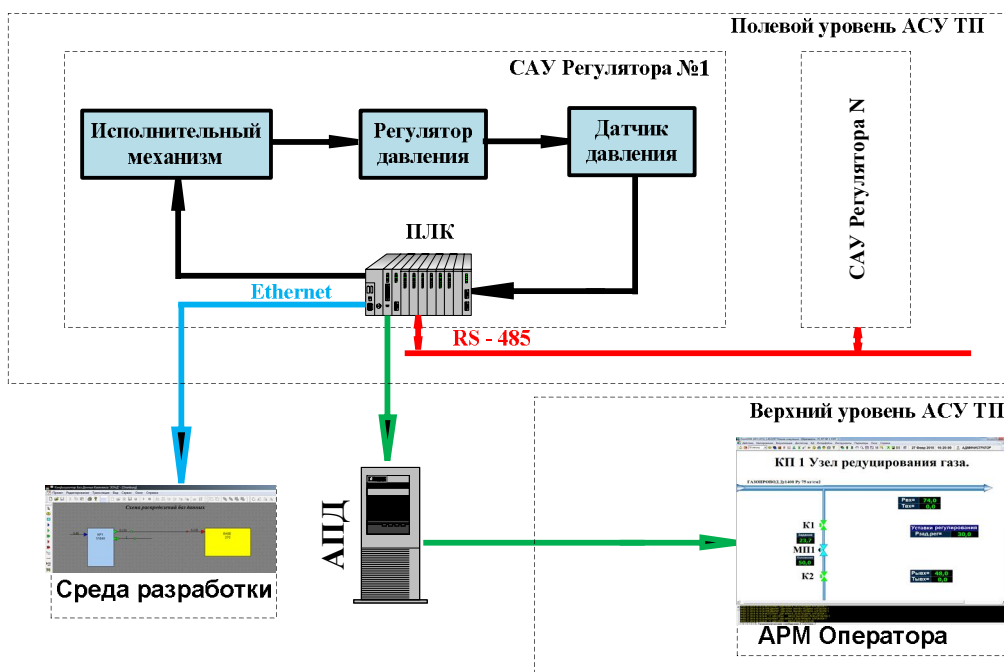


Рис. 2. Функциональная схема системы управления

### Описание способа управления

Использование ПЛК в качестве устройства управления позволяет создавать управляющие системы любой сложности [5, 6]. Однако при их реализации возникают определенные проблемы, основной из которых является невозможность поддержания заданного значения давления на выходе узла редуцирования. Все это связано с переменным режимом работы газопровода, который характеризуется динамически изменяющимся входным давлением на узел редуцирования газа [7]. В связи с этим отсутствует возможность корректного функционирования регулирующих механизмов и системы автоматики в целом.

Основные критерии, предъявляемые к системе управления узлом редуцирования газа, заключаются в следующем:

– точность регулирования: давление газа на выходе должно составлять  $\pm 0,1$  кг/см<sup>2</sup>;

– скорость регулирования: достижение заданной уставки по давлению  $\pm 3$  с.

Почти все производители ПЛК включают в свою среду разработки SCADA-системы блок управления, реализованный на законе ПИД-регулирования [7]. Пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор – один из самых распространенных типов регуляторов, однако, как показывает практика, его применение не всегда обеспечивает достаточно высокую точность управления технологическими процессами [8]. Даже достаточно хорошо смоделированный технологический процесс не может учесть полноту описания параметров, влияющих на качество регулирования.

На российском рынке систем автоматизации представлен достаточно обширный список систем, построенных на ПЛК таких фирм, как ТЭКОН, ОВЕН, МСКУ, СТН-3000 и т. д. [9]. Однако ПАО «Газпром» в ходе проведенных испытаний на линейной части магистральных газопроводов была рекомендована к применению система телемеханики «Магистраль-2», не имеющая аналогов в своем классе. Модульный принцип построения, соответствие требуемым характеристикам, а также гибкость функционирования позволили системе занять одно из ведущих мест на рынке автоматизации газотранспортных предприятий.

Данные ПЛК запрограммированы в соответствии с ИЕС 61131 в среде разработки ZondDataBaseConfigurator модуля УСО «Вычислитель», на встроенном в него языке программирования ST (структурированный текст).

В классическом виде работа ПИД-регулятора давления газа описывается следующим математическим выражением [10]:

$$u(t) = P + I + D = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de}{dt}, \quad (1)$$

где  $u(t)$  – управляющее воздействие на регулятор давления;

$e(t)$  – ошибка (рассогласование);

$K_p, K_i, K_d$  – пропорциональный, интегральный и дифференциальный коэффициенты усиления регулятора.

На практике широкое распространение получила методика настройки ПИД-регулятора, использующая формулу для определения выходного сигнала, в которой на пропорциональный коэффициент умножена интегрирующая и дифференцирующая составляющая [11]:

$$u(t) = K_p \left( e(t) + K_{ip} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_{dp} \frac{de}{dt} \right). \quad (2)$$

Однако в подавляющем большинстве случаев на производстве подбор коэффициентов ПИД-регулятора осуществляется на основании знаний эксперта.

Ввиду отсутствия полной информации о характеристиках объекта управления и возможным появлением нелинейности и неустойчивости в поведении системы на практике настройка коэффициентов ПИД-регулятора осуществляется методом экспериментальной регулировки [12].

### Апробация САР давления

Для проверки работоспособности блока ПИД-регулятора был проведен эксперимент на УРГ, который показал, что система регулирования давления газа в газопроводе работоспособна (рис. 3).

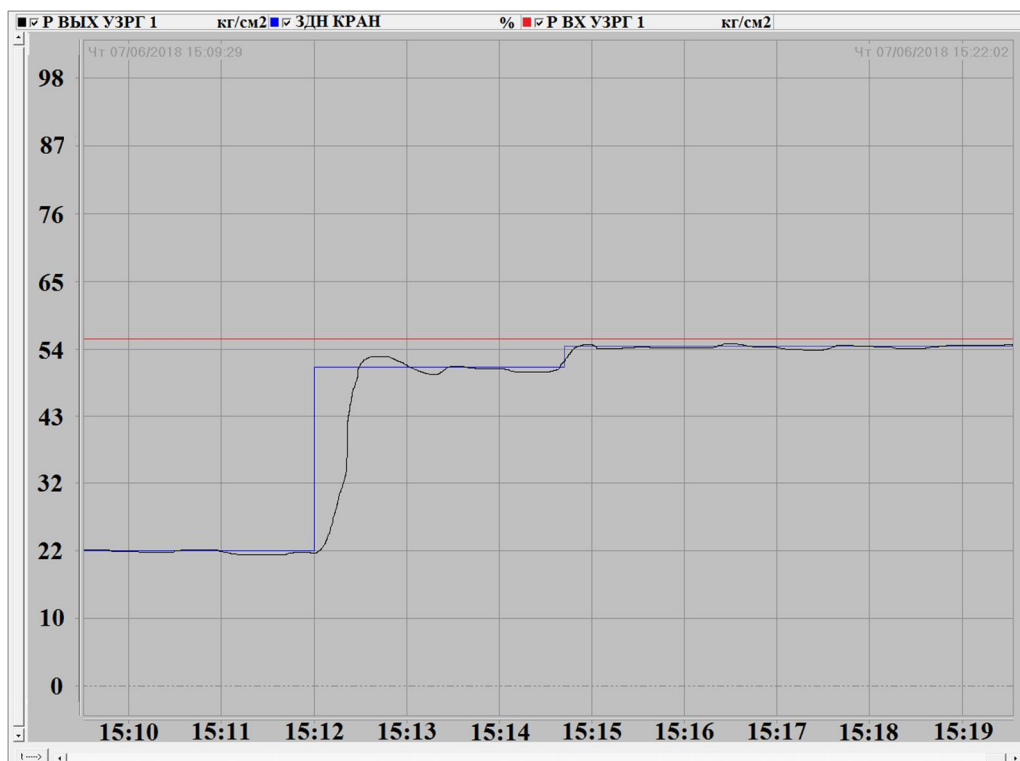


Рис. 3. График работы ПИД-регулятора при статистическом входном давлении:  
P Вых УЗРГ 1 – график выходного давления газа с узла редуцирования;  
ЗДН КРАН – график заданного значения давления на регулятор (уставка);  
P Вх УЗРГ 1 – график входного давления газа на узел редуцирования

Тем не менее, хотя процесс управления практически не имеет статической ошибки (отклонения от заданного давления в установившемся режиме), присутствует динамическое отклонение (перерегулирование). Кроме того, при переходе на более высокую уставку давления возникает появление непрерывных автоколебаний, что отрицательно сказывается на процессе регулирования давления газа.

Далее апробируем работу ПИД-регулятора с переменным режимом работы газопровода. Данный режим обусловлен постоянными динамическими изменениями входного давления в УРГ (рис. 4).

Из графиков на рис. 4 можно сделать вывод о том, что использование системы автоматического ПИД-регулирования в системе редуцирования давления газа возможно, однако для снижения перерегулирования необходимо вносить дополнительные изменения в настройки коэффициентов регулятора в зависимости от изменения давления на входе. Поэтому в системе редуцирования давления газа в сочетании с классическими законами управления необходимо использовать методы адаптивного управления.

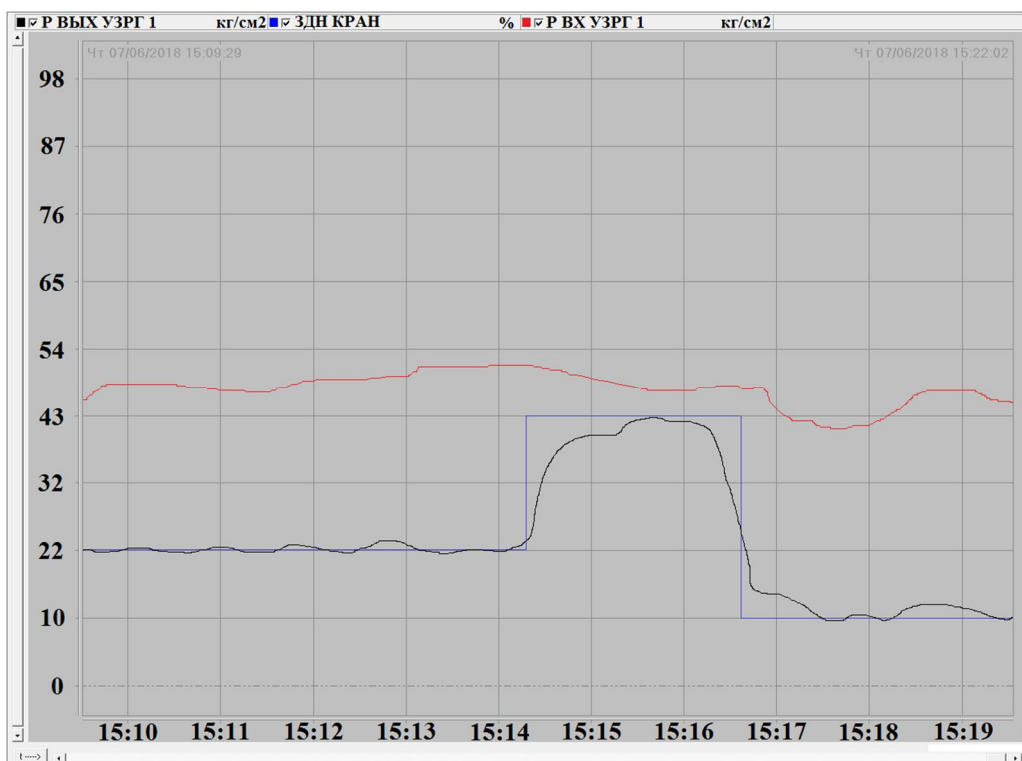


Рис. 4. График работы ПИД-регулятора с динамически изменяющимся входным давлением:

- Р ВЫХ УЗРГ 1 – график выходного давления газа с узла редуцирования;
- ЗДН КРАН – график заданного значения давления на регулятор (уставка);
- Р ВХ УЗРГ 1 – график входного давления газа на узел редуцирования

### Автоматическая настройка и адаптация

Методы адаптивного управления – это один из выходов, который позволяет свести к минимуму процесс перерегулирования. Но необходимо отметить, что на данный момент отсутствуют простые, надежные и общепринятые методы автоматической настройки. Важно подчеркнуть то, что контроллер не может выдать требуемого качества регулирования несмотря на наличие в нем автоматической настройки и качество заложенных в его память алгоритмов управления. Например, на стадии разработки объект управления может быть недостаточно хорошо спроектирован (иметь зависимые контуры регулирования, большую задержку или высокий порядок объекта); характеристики объекта могут быть нелинейными; датчик может иметь большую погрешность измерения; источник воздействия на объект управления – иметь гистерезис или слишком большую инерционность [13]. Данные факторы обуславливаются невозможностью микропроцессорной техники выполнять сложные и плохо формализованные задачи лучше, чем человек. Исключить данные факторы позволяет такая разновидность адаптации, как разомкнутое управление параметрами ПИД-регулятора (табличная автонастройка) [14].

Опытный эксперт заранее определяет коэффициенты регулятора для разных условий работы системы и заносит их таблицу. При возникновении условий адаптации они извлекаются. Табличная автонастройка может быть использована не только для адаптивного управления, но и для управления нелинейными объ-

ектами и динамическими процессами, такими как постоянно изменяющееся давление на входе регулятора [15, 16]. Разработанная структурная схема адаптивного ПИД-регулятора давления газа представлена на рис. 5.

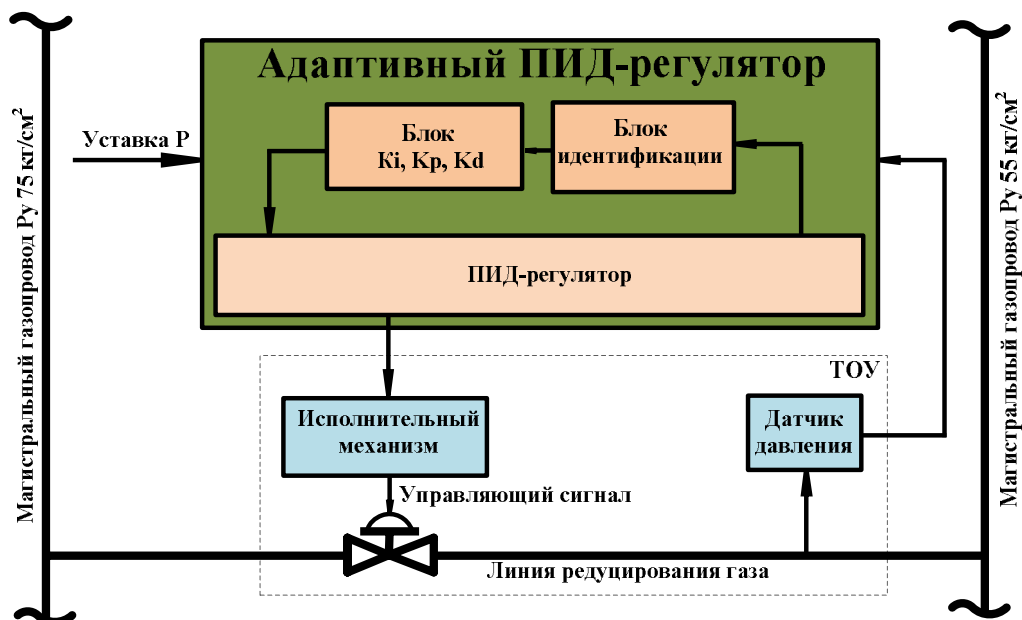


Рис. 5. Адаптивный ПИД-регулятор давления газа

Принцип действия табличного управления регулятором давления газа описывается следующим образом. Заданная уставка давления поступает на вход адаптивного ПИД-регулятора с установленными в нем стартовыми (начальными) коэффициентами. Регулятор, в свою очередь, выдает управляющий сигнал на исполнительный механизм – редуцирующий клапан.

Качество регулирования оценивается путем сопоставления показаний датчика давления, установленного после регулятора, и заданной уставки. Если ошибка регулирования возрастает, в контур системы включается адаптивное звено регулятора, состоящее из блока идентификации и блока коэффициентов регулятора.

Блок идентификации оценивает величину, на которую изменились показания давления за определенный промежуток времени (скорость изменения), по критериям, заложенным экспертом. Например:

- давление газа незначительно увеличилось (уменьшилось) в пределах  $\pm 0,3 \text{ кг/см}^2$ ;
- давление газа возросло (уменьшилось) в пределах  $\pm 0,7 \text{ кг/см}^2$ ;
- давление газа резко возросло (уменьшилось) в пределах  $\pm 1,4 \text{ кг/см}^2$ .

Принадлежность к тому или иному критерию оценивается за счет сравнения установленной величины и величины возмущающего воздействия. Далее сформированный критерий сопоставляется со значениями коэффициентов ПИД-регулятора из таблицы, просчитанной под различные режимы работы.

## Режимные коэффициенты регулятора

Режим работы регулятора		$K_p$	$K_i$	$K_d$
1	$P\uparrow(\downarrow)$	2,546	0,841	1,967
2	$P\uparrow\uparrow(\downarrow\downarrow)$	7,482	2,992	4,673
3	$P\uparrow\uparrow\uparrow(\downarrow\downarrow\downarrow)$	8,993	5,994	3,373

Алгоритм работы данной системы представлен на рис. 6.

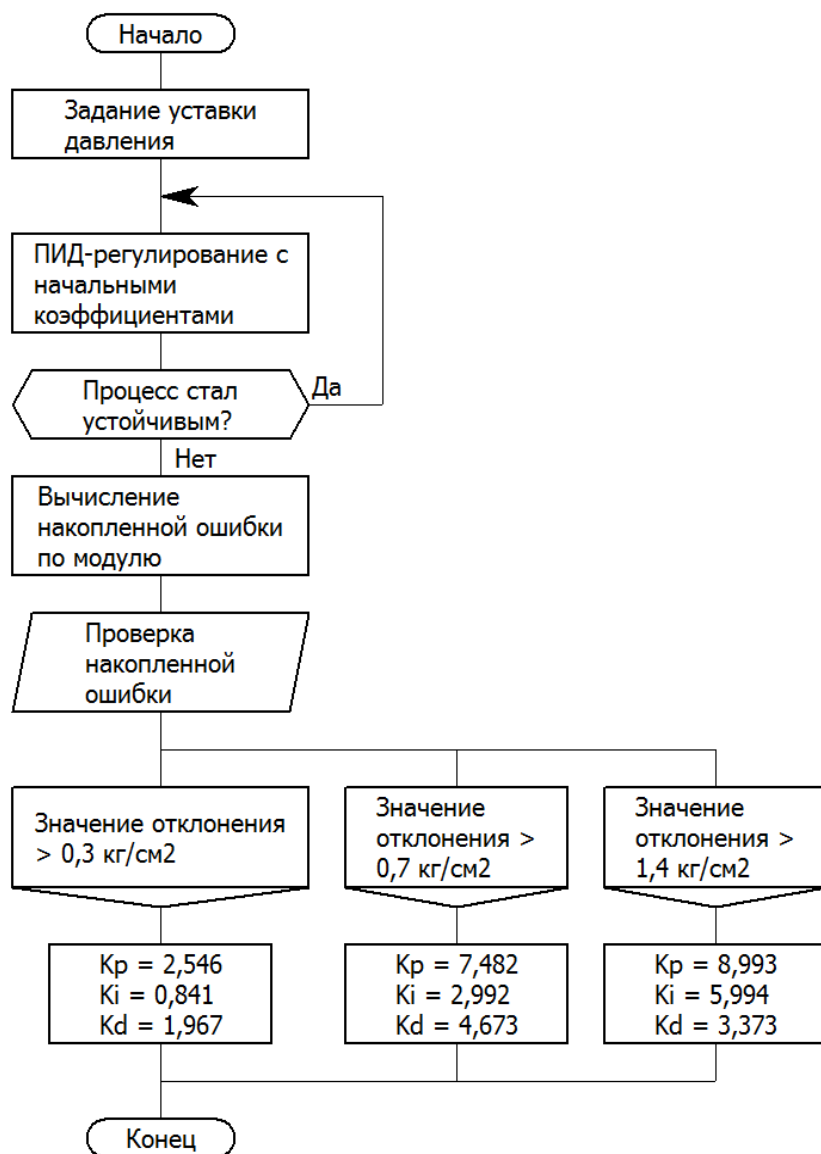


Рис. 6. Алгоритм управления адаптивным ПИД-регулятором с табличной автонастройкой



Разберем последовательность действий данного алгоритма. Оператором (диспетчером) осуществляется задание уставки давления газа на выходе узла редуцирования, и происходит процесс регулирования по ПИД-закону, с начальными коэффициентами. Далее проверяется условие устойчивости процесса регулирования, другими словами, требуемое качество переходного процесса. Если процесс является устойчивым, коэффициенты ПИД-регулятора не изменяются, в противном случае происходит подсчет накопленной ошибки регулирования по модулю. На втором этапе происходит проверка накопленной ошибки и ее идентификация согласно заданным значениям отклонения. Затем происходит подстановка значений коэффициентов ПИД-регулятора, заранее идентифицированных экспертом и занесенных в таблицу.

Рассмотренную систему можно представить как систему, у которой присутствуют два контура регулирования [17]. Контур, используемый для адаптации в рассмотренном случае (с давлением газа на входе регулятора), является разомкнутым. Отсюда следует, что табличное управление характеризуется высоким быстродействием, отсутствием ложного срабатывания или расхождения алгоритмов адаптации (рис. 7).

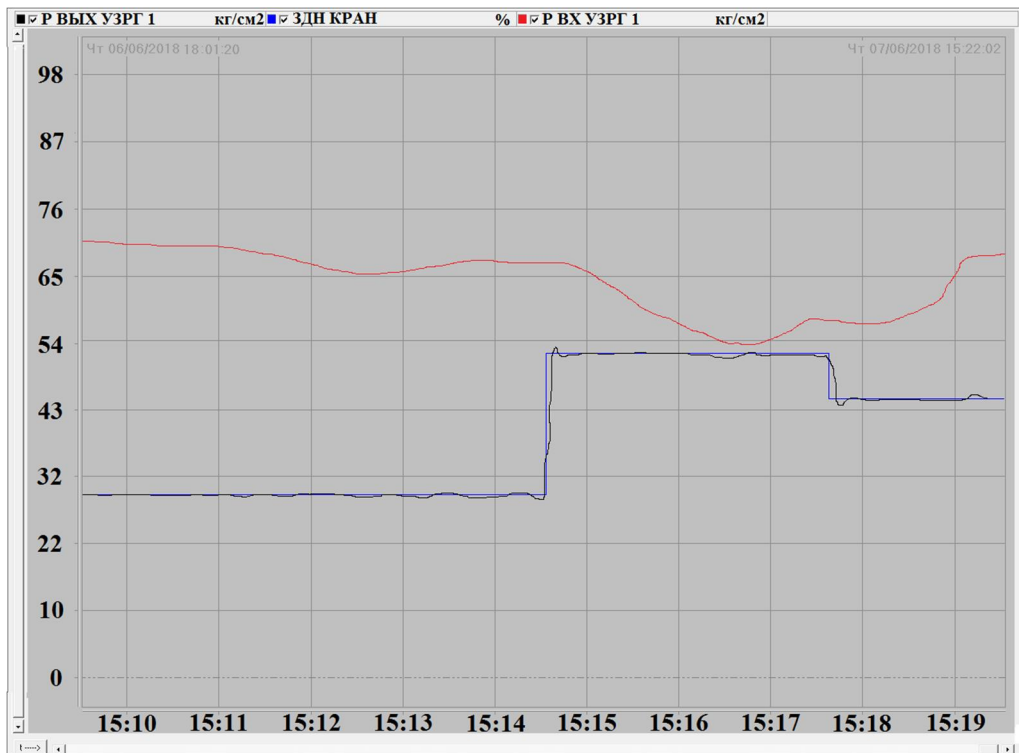


Рис. 7. Работа адаптивного ПИД-регулятора с табличной автонастройкой:  
P ВЫХ УЗРГ 1 – график выходного давления газа с узла редуцирования;  
ЗДН КРАН – график заданного значения давления на регулятор (уставка);  
P ВХ УЗРГ 1 – график входного давления газа на узел редуцирования

## Заключение

В данной статье был рассмотрен процесс редуцирования газа в магистральном газопроводе как объект управления, а также произведено наглядное сравнение методов классического и адаптивного регулирования. Из представленных графиков (рис. 3; 4; 7) можно сделать вывод о том, что в ходе рассмотренного технологического процесса классический закон ПИД-регулирования может быть использован только при статистических входных параметрах, в противном случае для управления технологическим процессом необходимо включать блок адаптации. Разработанный алгоритм управления адаптивным ПИД-регулятором (рис. 6) позволяет добиться заданных значений, сочетая в себе классический закон регулирования со знаниями и умениями экспертов, что является неоспоримым достоинством данного метода.

Подводя итоги выше изложенного, можно сделать вывод о том, что такой вид адаптации, как табличное управление, целесообразно применять в тех случаях, когда типы и величина дестабилизирующих факторов известны заранее. Этот метод позволяет значительно улучшить качество регулирования, а также установить взаимосвязь между параметрами объекта, выбрав значения коэффициентов в зависимости от конкретной ситуации. Данный вид адаптации может быть использован для управления нелинейными объектами и динамическими процессами, где существует необходимость изменения параметров в зависимости от определенных условий.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Козаченко А.Н. Эксплуатация компрессорных станций магистральных газопроводов. – М.: Нефть и газ, 1999. – 463 с.
2. Крюков В.В., Тугов В.В. Управление редуцированием газа в магистральных газопроводах высокого давления с применением аппарата нечеткой логики // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2019. – № 1 (49). – С. 55–65.
3. Гуревич Д.Ф., Заринский О.Н., Косых С.И. Трубопроводная арматура с автоматическим управлением: Справочник. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. – 320 с.
4. Петров И.В. Программируемые логические контроллеры. Стандартные языки и инструменты. – М.: СОЛОН-Пресс, 2003. – 256 с.
5. Воронов А.А., Ким Д.П., Лохин В.М. Теория автоматического управления. – М.: Высшая школа, 1986. – С. 504.
6. Крюков В.В. Применение нечеткой логики в процессе управления редуцированием газа в магистральных трубопроводах // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика: IX Междунар. интернет-конф. молодых ученых, аспирантов и студентов (InnoTech 2017). – С. 122–127.
7. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. – М.: Горячая линия-Телеком, 2009. – С. 608.
8. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления. – М.: Машиностроение, 1986. – С. 448.
9. Сергеев А.И., Черноусова А.М., Русяев А.С., Тугов В.В. Системы промышленной автоматизации: учеб. пособие. – Оренбург: ОГУ, 2017. – С. 105.
10. Красовский А.А. Справочник по теории автоматического управления. – М.: Наука, 1987. – С. 712.
11. Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации // СТА. – 2007. – № 4. – С. 86–97; 2008. – № 1. – С. 99.
12. Олссон Г., Пиани Д. Цифровые системы автоматизации и управления. – СПб. Невский Диалект, 2001. – С. 379.
13. Макаров И.М., Менский Е.М. Линейные автоматические системы. – М.: Машиностроение, 1982. – С. 464.

14. Штейнберг Ш.Е., Серезжин Л.П., Залуцкий И.Е., Варламов И.Г. Проблемы создания и эксплуатации эффективных систем регулирования // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2004. – № 7. – С. 1–7.
15. Wen Tan, Jizhen Liu, Tongwen Chen, Horacio J. Marquez. Comparison of some well-known PID tuning formulas // Computers and Chemical Engineering. – 2006. – № 30. – P. 1416–1423.
16. Hemerly E.E. PC-based packages for identification, optimization, and adaptive control // IEEE Control Systems Magazine. – Feb. 1991. – Vol. 11. – Issue 2. – P. 37–43.
17. Oviedo J.J.E., Boelen T., van Overschee P. Robust advanced PID control (RaPID): PID tuning based on engineering specifications // IEEE Control Systems Magazine. Feb. 2006. Vol. 26. Issue 1. – P. 15–19.

*Статья поступила в редакцию 28 июня 2019 года*

## MANAGING THE PROCESS OF REDUCTION GAS IN GAS PIPELINES.

**V.V. Kryukov, V.V. Tugov**

Orenburg state University  
13, Pobedy st., Orenburg, 460018, Russian Federation

**Abstract.** *The control laws of the high-pressure control valve on the gas reduction unit are considered. The system performance testing using the classical law of PID regulation in the SCADA-module Zond 2006 was performed. Identified problems and destabilizing factors affecting the quality of process control. Proposed and approved combined method that combines adaptive PID controller auto-tuning with the (table autotuning). This method has significantly improved the quality of regulation, and allowed to maintain the set value of the pressure at a constantly changing pressure at the inlet of the pipeline.*

**Keywords:** *gas reduction, variable gas pipeline operation mode, PID controller, adaptation, table autotuning, algorithm.*

### REFERENCES

1. Kozachenko A.N. Eksploatatsiya kompressornykh stantsiy magistral'nykh gazoprovodov [Operation of compressor stations of main gas pipelines]. Moskva. Neft' i gaz. 1999. – P. 463 (In Russian).
2. Kryukov V.V., Tugov V.V. Upravlenie reducirovaniem gaza v magistral'nykh gazoprovodakh vysokogo davleniya s primeneniem apparata nechetkoj logiki // Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Povolzhskij region. Tekhnicheskie nauki. – 2019. – № 1 (49). – P. 55–65.
3. Gurevich D.F., Zarinskiy O.N., Kosykh S.I. Truboprovodnaya armatura s avtomaticheskim upravleniyem. Spravochnik [Pipe fittings with automatic control. Handbook]. L.: Mashinostroyeniye, Leningr. otd-niye. – 1982. – P. 320 (In Russian).
4. Petrov I.V. Programmiryemyye logicheskiye kontrollery. Standartnyye yazyki i instrument [Programmable logic controller. Standard languages and tool] Podred. prof. V. P. D'yakonova. M.: SOLON-Press, 2003. – P. 256 (In Russian).
5. Voronov A.A., Kim D.P., Lokhin V.M. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya [Automatic control theory]. M.: Vysshaya shkola. 1986. – P. 504 (In Russian).
6. Kryukov V.V. Primeneniye nechetkoj logiki v protsesse upravleniya redutsirovaniyem gaza v magistral'nykh truboprovodakh [Application of fuzzy logic in the process of gas reduction control in main pipelines] // Innovatsionnyye tekhnologii: teoriya, instrumenty, praktika: IX Mezhdunarod-

---

Vladimir V. Kryukov, Postgraduate Student.  
Vitaly V. Tugov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

- noy Internet-konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov (InnoTech 2017). – P. 122–127 (In Russian).
7. *Denisenko V.V.* Komp'yuternoye upravleniye tekhnologicheskim protsessom, eksperimentom, oborudovaniyem [Computer control of technological process, experiment, equipment]. M.: Goryachaya liniya-Telekom, 2009. – P. 608 (In Russian).
  8. *Kuo B.* Teoriya i proyektirovaniye tsifrovyykh sistem upravleniya [Theory and design of digital control systems]. M.: Mashinostroyeniye, 1986. – P. 448 (In Russian).
  9. *Sergeyev A.I., Chernousova A.M., Rusyayev A.S., Tugov V.V.* Sistemy promyshlennoy avtomatizatsii: uchebnoye posobiye [Industrial automation systems: tutorial]. – Orenburg: OGU, 2017. – P. 105 (In Russian).
  10. *Krasovskiy A.A.* Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya [Handbook of automatic control theory]. M.: Nauka, 1987. – P. 712 (In Russian).
  11. *Denisenko V.V.* PID-regulyatory: voprosy realizatsii [PID regulators: implementation issues] // STA, 2007, № 4, P. 86–97; 2008, № 1, P. 99 (In Russian).
  12. *Olsson G., Piani D.* TSifrovyye sistemy avtomatizatsii i upravleniya [Digital automation and control systems]. SPb. Nevskiy Dialekt, 2001. – P. 379 (In Russian).
  13. *Makarov I.M., Menskiy E.M.* Lineynyye avtomaticheskkiye sistemy [Linear automatic systems] // M.: Mashinostroyeniye, 1982. – P. 464 (In Russian).
  14. *SHteynberg S.H.E., Serezhin L.P., Zalutskiy I.E., Varlamov I.G.* Problemy sozdaniya i ekspluatatsii effektivnykh sistem regulirovaniya [Problems of creation and operation of effective control systems]. Promyshlennyye ASU i kontrollery. 2004. № 7. – P. 1–7.
  15. *Wen Tan, Jizhen Liu, Tongwen Chen, Horacio J. Marquez.* Comparison of some well-known PID tuning formulas // Computers and Chemical Engineering. – 2006. – № 30. – P. 1416–1423.
  16. *Hemerly E.E.* PC based packages for identification, optimization, and adaptive control // IEEE Control Systems Magazine. Feb. 1991. Vol. 11. Issue 2. – P. 37–43.
  17. *Oviyedo J.J.E., Boyelen T., van Overscheye P.* Robust advanced PID control (RaPID): PID tuning based on engineering specifications // IEEE Control Systems Magazine. Feb. 2006. Vol. 26. Issue 1. – P. 15–19.