

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКИХ СУПЕРВИЗОРНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ РЕДУЦИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ ГАЗА НА ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

В.В. Крюков (ОГУ, ООО "Газпром трансгаз Екатеринбург"), В.В. Тугов (ОГУ)

Рассматриваются проблемы системы управления редуцированием давления газа в магистральных газопроводах, реализованной с помощью классического закона ПИД-регулирования. Предложен новый, комбинированный подход, включающий в себя классический закон ПИД-регулирования и процесс адаптации с применением аппарата нечеткой логики. Произведена апробация и сравнение качества процесса управления клапаном-регулятором высокого давления при дестабилизирующих входных параметрах.

Ключевые слова: давление, редуцирование давления газа, ПИД-регулятор, супервизорное управление, нечеткая логика.

Главной задачей газотранспортных предприятий России является бесперебойная подача газа потребителям, а также безаварийная эксплуатация оборудования. Основным звеном системы транспортировки сырья выступает линейная часть магистрального газопровода (ЛЧ МГ), в состав которой входят узлы редуцирования давления газа (УРГ), участвующие в процессе перепуска газа с газопровода, имеющего большое давление, в газопровод с меньшим давлением. Типичный УРГ состоит из основной и обводной нитки, с установленной на них запорно-регулирующей арматурой (клапанами-регуляторами), а также отсечными крановыми узлами. Управление данным объектом, как правило, осуществляется с помощью систем линейной телемеханики (СЛТМ), в состав которой входит ПЛК с набором плат ввода/вывода, осуществляющий телеизмерение, телесигнализацию и телеуправление объектами УРГ, а также передачу информации на верхний уровень при помощи аппаратуры передачи данных (АПД) [1].

В качестве регулирующего органа на узлах редуцирования давления газа ЛЧ МГ применяются клапаны различного типа и фирм производителей, однако в 67% от общего регуляторов используются клапаны осевого типа. Высокая востребованность данных клапанов обусловлена тем, что его конструкция обеспечивает спрямленное течение среды.

Регулирующий клапан RZD-REQX 28"/ANSI 600F состоит из исполнительного механизма и регулирующего органа. Исполнительный механизм представляет собой электропневматический преоб-

разователь с входным сигналом 4...20 мА и выходным 3...15 фунт/дюйм². Пневматический сигнал подается в качестве управляющего на клапанный позиционер, который осуществляет задающее воздействие на регулируемый орган, представляющий устройство поршневого типа. Поршень при помощи реечной передачи перемещается в сепараторе, тем самым обеспечивая изменение площади сечения между кромкой и отверстиями сепаратора и дросселирование потока газа. Структурная схема поддержания заданного выходного давления после клапана-регулятора приведена на рис. 1.

Не смотря на развитие современных методов проектирования сложных регуляторов, большинство систем управления основаны на законе ПИД-регулирования. Данные регуляторы в большинстве случаев обеспечивают приемлемое качество управления, имеют низкую стоимость и в связи с этим массово используются на предприятиях.

Зачастую реализуемые в ПЛК алгоритмы управления разрабатываются без учета постоянно изменяющегося давления на входе узла редуцирования, то есть динамических свойств объекта. В процессе эксплуатации были выявлены некоторые негативные факторы, сопровождающие работу клапанов-регуляторов: сложность в настройке автоматического режима стабилизации давления и плохие динамические свойства (длительные переходные процессы, автоколебания). Все эти факторы негативно отражаются не только на самом процессе регулирования, но и зачастую приводят к выходу из строя механиче-

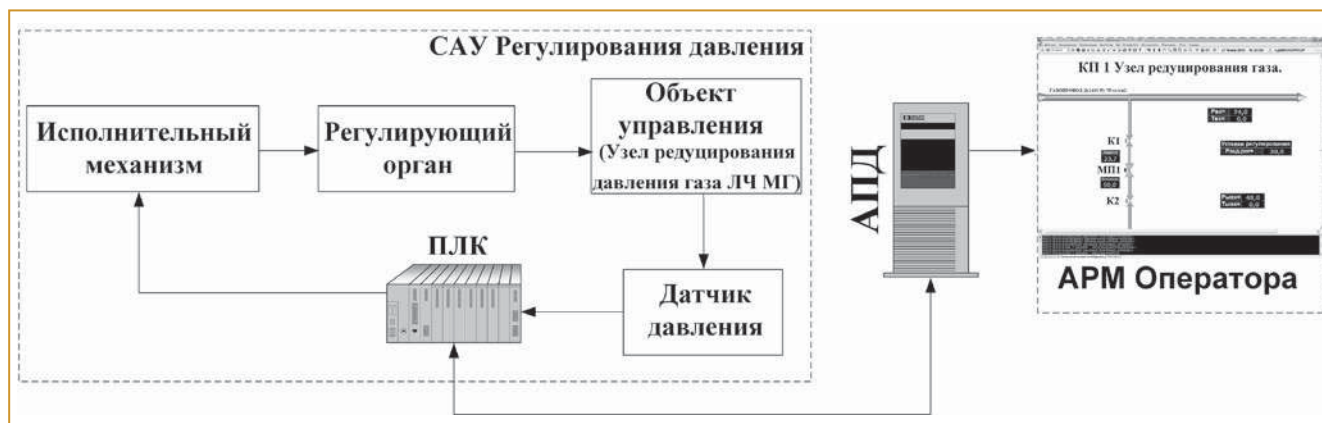


Рис. 1. Структурная схема САУ редуцированием давления газа



Рис. 2. Выход из строя механической части клапана

Таблица 1. Насчета коэффициентов ПИД-регулятора данным методом Зиглера – Никольса

Метод настройки	K_P	K_I	K_D
Зиглера – Никольса	$0,6K_U$	$1,2 K_U/T_U$	$3 K_U T_U/40$

ской части клапанов, таких как рейка, шток, сепаратор, уплотнения [2] (рис. 2).

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод о том, что классический закон ПИД-регулирования не обеспечивает эффективного регулирования параметров транспортируемого газа, что создает предпосылки для разработки специализированного аппаратно-программного комплекса управления.

В последнее время для управления сложными нестационарными объектами широкое распространение получили супервизорные регуляторы, сочетающие классический ПИД-закон управления и аппарат нечеткой логики. Известно, что нечеткое управление основано не столько на использовании аналитических или теоретических моделей, сколько на практическом применении знаний квалифицированных специалистов.

Процесс автонастройки регулятора с помощью блока нечеткой логики начинается с поиска началь-

ных приближенных коэффициентов регулятора K_P , K_I , K_D , где: K_P — пропорциональный, K_I — интегральный и K_D — дифференциальный коэффициенты ПИД-регулятора соответственно.

В настоящее время существует множество методов для настройки ПИД-регуляторов, но выделить лишь основные из них: метод Зиглера Никольса и метод Чена-Кронеса-Ресвика (CHR) без перерегулирования и с 20% отклонением.

Как правило, на практике в основном используется метод Зиглера — Никольса. Суть данного метода заключается в нахождении коэффициента K_U , при котором в системе возникают незатухающие колебания [3]. Формулы для расчета коэффициентов ПИД-регулятора данным методом представлены в табл. 1.

После расчета параметров регулятора требуется их корректировка, необходимая для улучшения качества регулирования процесса. Для этого используются различные методы, включая настройку ПИД регулятора при помощи аппарата нечеткой логики [4]. Блок-схема нечеткого регулятора показана на рис. 3.

Как видно из блок-схемы, формирование управляющих воздействий U_1, U_2, U_3, U_n на регулятор включает в себя следующие этапы:

а) получение отклонений управляемых измеряемых величин и скоростей их изменения — X_1, X_2, X_3, X_n ;

б) «фазификация» данных, то есть переход к нечеткой форме в виде лингвистических переменных;

в) определение нечетких (качественных) значений выходных переменных (в виде функций принадлежности к соответствующим нечетким подмножествам) на основе заранее сформулированных правил вывода;

г) «дефазификация», то есть переход от «нечетких значений» к реальным числовым значениям выходов, используемым для управления объектом — U_1, U_2, U_3, U_n .



Рис. 3. Блок-схема нечеткого логического регулятора

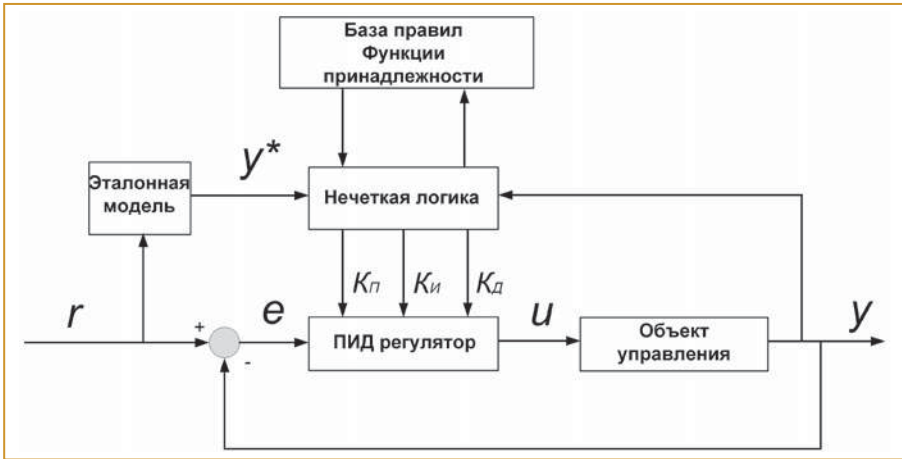


Рис. 4. Структурная схема супервизорного ПИД-регулятора

Помимо возможности «чистого» использования нечеткого управления, существуют и другие варианты построения регуляторов с применением аппарата нечеткой логики [5]. Так, в классическом виде работа ПИД-регулятора давления газа описывается следующим математическим выражением:

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

где $u(t)$ — управляющее воздействие на регулируемый орган; $e(t)$ — ошибка (рассогласование).

Коэффициенты K_p , K_i , K_d следует выбирать исходя из заданных качественных показателей управления процессом (время достижения заданной уставки, перерегулирование и затухание переходных процессов).

Таким образом, качество процесса управления при использовании ПИД-регуляторов существенно зависит от выбора его коэффициентов усиления K_p , K_i , K_d для пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих. Большинство специалистов на практике выполняют поиск этих коэффициентов вручную, методом подбора. Данная процедура является довольно сложной и требует большого опыта проектирования автоматизированных систем управления. С другой стороны, наличие данного опыта позволяет построить определенный алгоритм для автоматической регулировки коэффициентов ПИД-регулятора при помощи аппарата нечеткой логики [6]. Рассмотрим один из способов решения данной проблемы.

Структурная схема супервизорного ПИД-регулятора давления газа с эталонной моделью представлена на рис. 4.

Создается база правил, для подстройки коэффициентов ПИД — регулятора, основанная на опыте эксперта.

Далее выбираются три показателя: время достижения 10% от заданного значения (t_1); время нарастания, то есть достижения 90% от уставки (t_n); превышение заданного значения (σ). Для проведения процедуры фазификации построим функции принадлежности (рис. 5).

В лингвистических переменных нечеткой логики управляющие воздействия на коэффициенты ПИД-регулятора может быть представлено пятью терминами [7] (рис. 6.).

Предположим, что цель, которая стоит перед нечетким регулятором, это обеспечение требуемых показателей качества системы управления t_1^* , t_n^* , σ^* за счет подстройки коэффициентов ПИД-регулятора. При этом будем учитывать правила, основанные на знаниях и опыте эксперта:

— если время достижения 10% от заданного значения

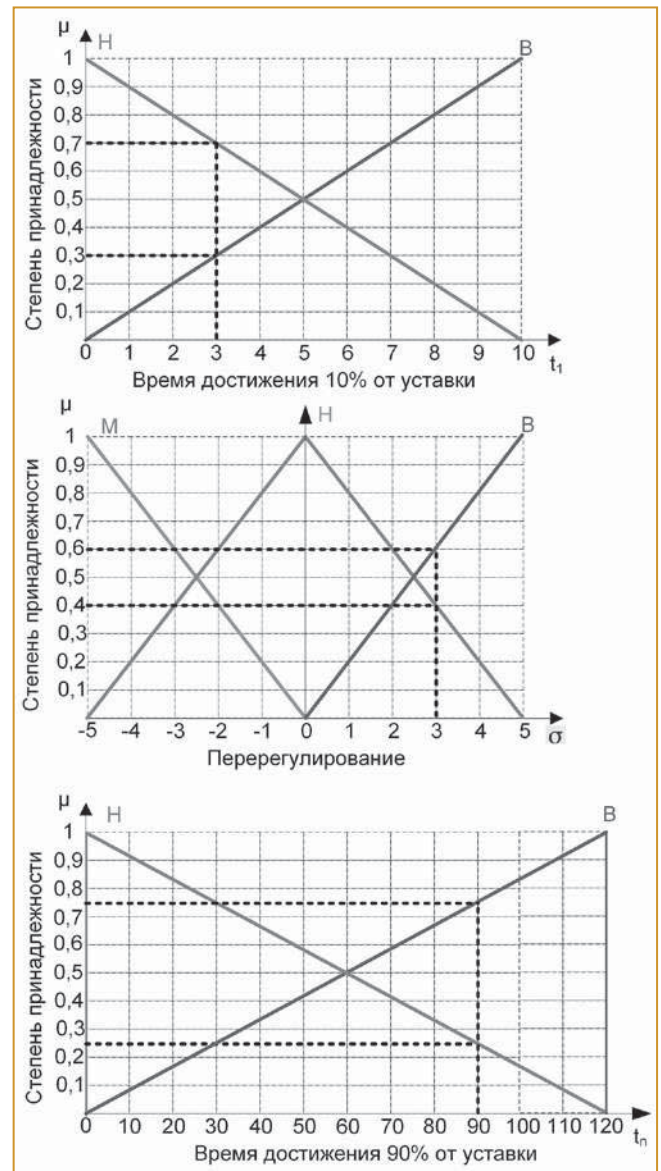


Рис. 5. Функции принадлежности, характеризующие показатели процесса

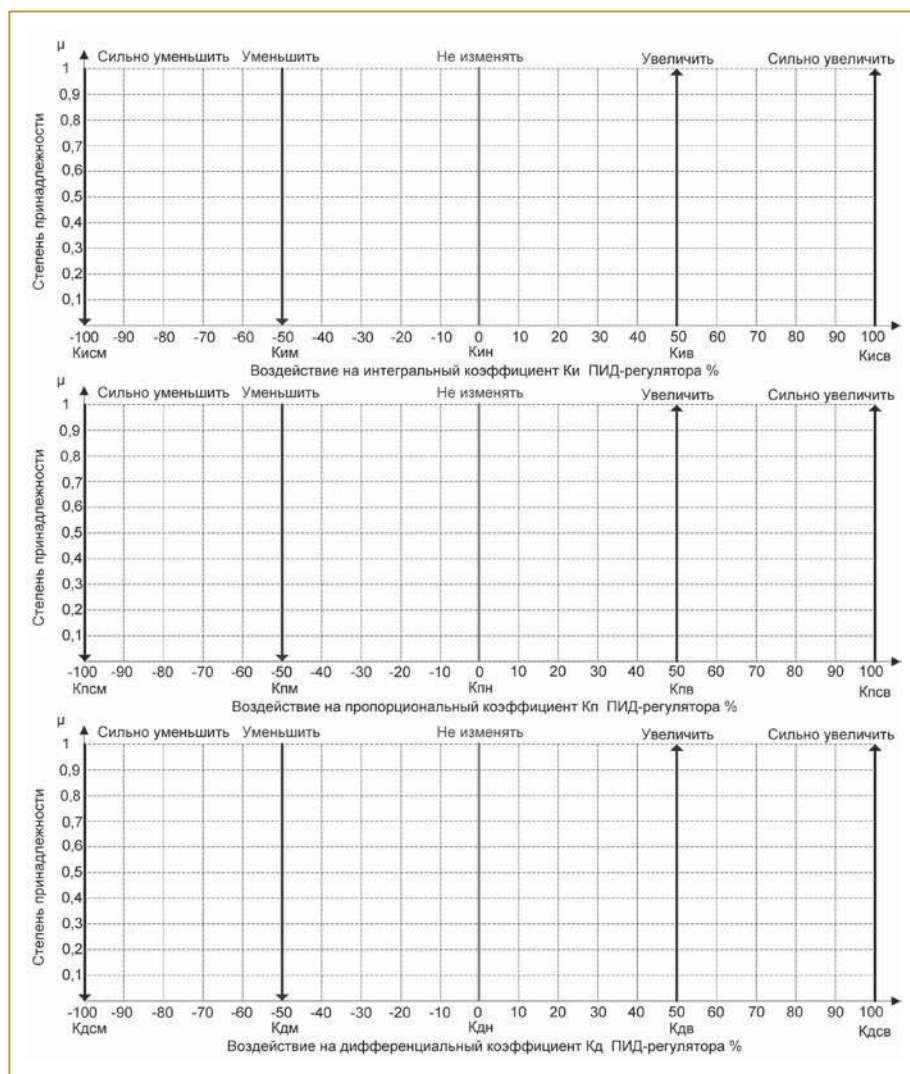


Рис. 6. Лингвистические переменные воздействия на коэффициенты ПИД-регулятора

интегральный коэффициент K_{II} , не изменяем пропорциональный коэффициент K_{II} и сильно увеличиваем дифференциальный коэффициент K_{II} .

Аналогично составляются остальные совокупности правил настройки ПИД-регулятора. Для удобства занесем их в табл. 2.

В качестве метода дефазификации нечетких переменных используется метод центра масс [8].

Рассмотрим пример, пусть время достижения 10% от заданного значения $t_1=3$ с; время нарастания, то есть достижения 90% от уставки $t_n=90$ с; а перерегулирование составляет $\sigma=3$ кг/см².

В этом случае термы Н и В времени достижения 10% от уставки имеют степень принадлежности равной 0,7 и 0,3 соответственно (рис. 5), термы Н и В времени нарастания составляют 0,75 и 0,25, а перерегулирования 0,4 и 0,6. Степень принадлежности к остальным термам равна 0.

На первом этапе формирования нечеткого вывода, согласно правилам в табл. 2, определим степень принадлежности термов выходной переменной по минимальному значению [9].

t_1 и время нарастания t_n увеличивается и перерегулирование σ возрастает, то увеличиваем интегральный коэффициент K_{II} , немного уменьшаем пропорциональный коэффициент K_{II} и не изменяем дифференциальный коэффициент K_{II} ;

— если время достижения 10% от заданного значения t_1 увеличивается и перерегулирование σ возрастает, а время нарастания t_n не изменяется, то немного увеличиваем интегральный коэффициент K_{II} , увеличиваем пропорциональный коэффициент K_{II} и немного увеличиваем дифференциальный коэффициент K_{II} ;

— если время достижения 10% от заданного значения t_1 и время нарастания t_n увеличиваются, а перерегулирование σ не изменяется, то немного увеличиваем интегральный K_{II} и пропорциональный коэффициент K_{II} и не изменяем дифференциальный коэффициент K_{II} ;

— если время достижения 10% от заданного значения t_1 увеличивается, а перерегулирование σ и время нарастания t_n не изменяется, то немного увеличиваем

Таблица 2. Настройки ПИД-регулятора

№	t_1	t_n	σ	K_{II}	K_{II}	K_{II}
1	В↑	В↑	В↑	В↑	М↓	Н
2	В↑	Н	В↑	В↑	В↑	В↑
3	В↑	В↑	Н	В↑	В↑	Н
4	В↑	Н	Н	В↑	Н	СВ↑↑
5	В↑	В↑	М↓	В↑	В↑	Н
6	В↑	Н	М↓	Н	В↑	Н
7	Н	В↑	В↑	В↑	М↓	Н
8	Н	Н	В↑	Н	М↓	М↓
9	Н	В↑	Н	В↑	В↑	Н
10	Н	Н	Н	Н	Н	Н
11	Н	В↑	М↓	СВ↑↑	М↓	В↑
12	Н	Н	М↓	М↓	В↑	Н

Здесь СМ↓↓ — сильно уменьшить; М↓ — уменьшить; Н — не изменять; В↑ — увеличить; СВ↑↑ — сильно

Для пропорционального звена K_I :

1. $\mu_{кив} = \min \{ \mu_{\sigma}(t_1); \mu_{\sigma}(t_n); \mu_{\sigma}(\sigma) \} = \min \{ 0,3; 0,75; 0,6 \} = 0,3$
2. $\mu_{кив} = \min \{ \mu_{\sigma}(t_1); \mu_n(t_n); \mu_{\sigma}(\sigma) \} = \min \{ 0,3; 0,25; 0,6 \} = 0,25$
3. $\mu_{кив} = \min \{ \mu_{\sigma}(t_1); \mu_{\sigma}(t_n); \mu_n(\sigma) \} = \min \{ 0,3; 0,75; 0,4 \} = 0,3$
4. $\mu_{кив} = \min \{ \mu_{\sigma}(t_1); \mu_n(t_n); \mu_n(\sigma) \} = \min \{ 0,3; 0,25; 0,4 \} = 0,25$
5. $\mu_{кив} = \min \{ \mu_{\sigma}(t_1); \mu_{\sigma}(t_n); \mu_m(\sigma) \} = \min \{ 0,3; 0,75; 0,0 \} = 0$
6. $\mu_{кин} = \min \{ \mu_{\sigma}(t_1); \mu_n(t_n); \mu_m(\sigma) \} = \min \{ 0,3; 0,25; 0 \} = 0$
7. $\mu_{кив} = \min \{ \mu_n(t_1); \mu_{\sigma}(t_n); \mu_{\sigma}(\sigma) \} = \min \{ 0,7; 0,75; 0,6 \} = 0,6$
8. $\mu_{кин} = \min \{ \mu_n(t_1); \mu_n(t_n); \mu_{\sigma}(\sigma) \} = \min \{ 0,7; 0,25; 0,6 \} = 0,25$
9. $\mu_{кив} = \min \{ \mu_n(t_1); \mu_{\sigma}(t_n); \mu_n(\sigma) \} = \min \{ 0,7; 0,75; 0,4 \} = 0,4$
10. $\mu_{кин} = \min \{ \mu_n(t_1); \mu_n(t_n); \mu_n(\sigma) \} = \min \{ 0,7; 0,25; 0,4 \} = 0,25$
11. $\mu_{кисв} = \min \{ \mu_n(t_1); \mu_{\sigma}(t_n); \mu_m(\sigma) \} = \min \{ 0,7; 0,75; 0 \} = 0$
12. $\mu_{ким} = \min \{ \mu_n(t_1); \mu_n(t_n); \mu_m(\sigma) \} = \min \{ 0,7; 0,25; 0 \} = 0$

Для пропорционального звена K_P :

1. $\mu_{кпм} = \min \{ \mu_{\sigma}(t_1); \mu_{\sigma}(t_n); \mu_{\sigma}(\sigma) \} = \min \{ 0,3; 0,75; 0,6 \} = 0,3$
2. $\mu_{кпв} = \min \{ \mu_{\sigma}(t_1); \mu_n(t_n); \mu_{\sigma}(\sigma) \} = \min \{ 0,3; 0,25; 0,6 \} = 0,25$
3. $\mu_{кпв} = \min \{ \mu_{\sigma}(t_1); \mu_{\sigma}(t_n); \mu_n(\sigma) \} = \min \{ 0,3; 0,75; 0,4 \} = 0,3$
4. $\mu_{кпв} = \min \{ \mu_{\sigma}(t_1); \mu_n(t_n); \mu_n(\sigma) \} = \min \{ 0,3; 0,25; 0,4 \} = 0,25$
5. $\mu_{кпв} = \min \{ \mu_{\sigma}(t_1); \mu_{\sigma}(t_n); \mu_m(\sigma) \} = \min \{ 0,3; 0,75; 0,0 \} = 0$
6. $\mu_{кпв} = \min \{ \mu_{\sigma}(t_1); \mu_n(t_n); \mu_m(\sigma) \} = \min \{ 0,3; 0,25; 0 \} = 0$
7. $\mu_{кпм} = \min \{ \mu_n(t_1); \mu_{\sigma}(t_n); \mu_{\sigma}(\sigma) \} = \min \{ 0,7; 0,75; 0,6 \} = 0,6$
8. $\mu_{кпм} = \min \{ \mu_n(t_1); \mu_n(t_n); \mu_{\sigma}(\sigma) \} = \min \{ 0,7; 0,25; 0,6 \} = 0,25$
9. $\mu_{кпв} = \min \{ \mu_n(t_1); \mu_{\sigma}(t_n); \mu_n(\sigma) \} = \min \{ 0,7; 0,75; 0,4 \} = 0,4$
10. $\mu_{кпв} = \min \{ \mu_n(t_1); \mu_n(t_n); \mu_n(\sigma) \} = \min \{ 0,7; 0,25; 0,4 \} = 0,25$
11. $\mu_{кпм} = \min \{ \mu_n(t_1); \mu_{\sigma}(t_n); \mu_m(\sigma) \} = \min \{ 0,7; 0,75; 0 \} = 0$
12. $\mu_{кпв} = \min \{ \mu_n(t_1); \mu_n(t_n); \mu_m(\sigma) \} = \min \{ 0,7; 0,25; 0 \} = 0$

Для дифференциального K_D звена соответственно:

1. $\mu_{кдн} = \min \{ \mu_{\sigma}(t_1); \mu_{\sigma}(t_n); \mu_{\sigma}(\sigma) \} = \min \{ 0,3; 0,75; 0,6 \} = 0,3$
2. $\mu_{кдв} = \min \{ \mu_{\sigma}(t_1); \mu_n(t_n); \mu_{\sigma}(\sigma) \} = \min \{ 0,3; 0,25; 0,6 \} = 0,25$
3. $\mu_{кдн} = \min \{ \mu_{\sigma}(t_1); \mu_{\sigma}(t_n); \mu_n(\sigma) \} = \min \{ 0,3; 0,75; 0,4 \} = 0,3$
4. $\mu_{кдсв} = \min \{ \mu_{\sigma}(t_1); \mu_n(t_n); \mu_n(\sigma) \} = \min \{ 0,3; 0,25; 0,4 \} = 0,25$
5. $\mu_{кдн} = \min \{ \mu_{\sigma}(t_1); \mu_{\sigma}(t_n); \mu_m(\sigma) \} = \min \{ 0,3; 0,75; 0,0 \} = 0$
6. $\mu_{кдн} = \min \{ \mu_{\sigma}(t_1); \mu_n(t_n); \mu_m(\sigma) \} = \min \{ 0,3; 0,25; 0 \} = 0$
7. $\mu_{кдн} = \min \{ \mu_n(t_1); \mu_{\sigma}(t_n); \mu_{\sigma}(\sigma) \} = \min \{ 0,7; 0,75; 0,6 \} = 0,6$
8. $\mu_{кдм} = \min \{ \mu_n(t_1); \mu_n(t_n); \mu_{\sigma}(\sigma) \} = \min \{ 0,7; 0,25; 0,6 \} = 0,25$
9. $\mu_{кдн} = \min \{ \mu_n(t_1); \mu_{\sigma}(t_n); \mu_n(\sigma) \} = \min \{ 0,7; 0,75; 0,4 \} = 0,4$
10. $\mu_{кдн} = \min \{ \mu_n(t_1); \mu_n(t_n); \mu_n(\sigma) \} = \min \{ 0,7; 0,25; 0,4 \} = 0,25$
11. $\mu_{кдв} = \min \{ \mu_n(t_1); \mu_{\sigma}(t_n); \mu_m(\sigma) \} = \min \{ 0,7; 0,75; 0 \} = 0$
12. $\mu_{кдн} = \min \{ \mu_n(t_1); \mu_n(t_n); \mu_m(\sigma) \} = \min \{ 0,7; 0,25; 0 \} = 0$

На втором этапе формирования определим степень принадлежности термов выходных переменных по максимальному значению. Например, выражения п. 3, 4, 5, 7 дают разные значения степени принадлежности для терма $\mu_{кив}$, но выбирается максимальное из них.

1. $\mu_{кин} = \max \{ \mu_{кин} \} = \max \{ 0; 0,25; 0,25 \} = 0,25$
2. $\mu_{кив} = \max \{ \mu_{кив} \} = \max \{ 0,3; 0,25; 0,3; 0,25; 0; 0,6; 0,4 \} = 0,6$
3. $\mu_{ким} = \max \{ \mu_{ким} \} = \max \{ 0,3; 0,6; 0,25; 0 \} = 0,6$
4. $\mu_{кпн} = \max \{ \mu_{кпн} \} = \max \{ 0,25; 0,25 \} = 0,6$
5. $\mu_{кпв} = \max \{ \mu_{кпв} \} = \max \{ 0,25; 0,3; 0; 0; 0,4; 0 \} = 0,4$
6. $\mu_{кдн} = \max \{ \mu_{кдн} \} = \max \{ 0,3; 0,3; 0; 0; 0,6; 0,4; 0,25; 0 \} = 0,4$
7. $\mu_{кдв} = \max \{ \mu_{кдв} \} = \max \{ 0,25; 0 \} = 0,25$

Таким образом, степени принадлежности термов выходных переменных имеют следующие значения (рис. 6):

1. $\{ \mu_{кисм}; \mu_{ким}; \mu_{кин}; \mu_{кив}; \mu_{кисв} \} = \{ 0; 0; 0,25; 0,6; 0 \}$
2. $\{ \mu_{кпсм}; \mu_{кпм}; \mu_{кпн}; \mu_{кпв}; \mu_{кпсв} \} = \{ 0; 0,6; 0,25; 0,4; 0 \}$
3. $\{ \mu_{кдсм}; \mu_{кдм}; \mu_{кдн}; \mu_{кдв}; \mu_{кдсв} \} = \{ 0; 0,25; 0,6; 0,25; 0,25 \}$

Для дефазификации поправочных коэффициентов S_I, S_P, S_D воспользуемся методом центра масс:

$$S_I = \frac{K_{ИСМ} \times \mu_{КИСМ} + K_{ИМ} \times \mu_{КИМ} + K_{ИН} \times \mu_{КИН}}{\mu_{КИСМ} + \mu_{КИМ} + \mu_{КИН} + \mu_{КИВ} + \mu_{КИСВ}} + \frac{K_{ИВ} \times \mu_{КИВ} + K_{ИСВ} \times \mu_{КИСВ}}{\mu_{КИСМ} + \mu_{КИМ} + \mu_{КИН} + \mu_{КИВ} + \mu_{КИСВ}}$$

$$S_P = \frac{K_{ПСМ} \times \mu_{КПСМ} + K_{ПМ} \times \mu_{КПМ} + K_{ПН} \times \mu_{КПН}}{\mu_{КПСМ} + \mu_{КПМ} + \mu_{КПН} + \mu_{КПВ} + \mu_{КПСВ}} + \frac{K_{ПВ} \times \mu_{КПВ} + K_{ПСВ} \times \mu_{КПСВ}}{\mu_{КПСМ} + \mu_{КПМ} + \mu_{КПН} + \mu_{КПВ} + \mu_{КПСВ}}$$

$$S_D = \frac{K_{ДВ} \times \mu_{КДВ} + K_{ДСВ} \times \mu_{КДСВ}}{\mu_{КДСМ} + \mu_{КДМ} + \mu_{КДН} + \mu_{КДВ} + \mu_{КДСВ}} + \frac{K_{ДВ} \times \mu_{КДВ} + K_{ДСВ} \times \mu_{КДСВ}}{\mu_{КДСМ} + \mu_{КДМ} + \mu_{КДН} + \mu_{КДВ} + \mu_{КДСВ}}$$

$$S_I = \frac{0 \times (-1) + 0 \times (-0,5) + 0,25 \times 0 + 0,6 \times 0,5 + 0 \times 1}{0 + 0 + 0,25 + 0,6 + 0} = 0,3529,$$

$$S_P = \frac{0 \times (-1) + 0,6 \times (-0,5) + 0,25 \times 0 + 0,4 \times 0,5 + 0 \times 1}{0 + 0,6 + 0,25 + 0,4 + 0} = -0,08,$$

$$S_D = \frac{0 \times (-1) + 0,25 \times (-0,5) + 0,6 \times 0 + 0,25 \times 0,5 + 0,25 \times 1}{0 + 0,25 + 0,6 + 0,25 + 0,25} = 0,1852.$$

Далее при помощи значений поправочных коэффициентов S_I, S_P, S_D вычислим величину изменения коэффициентов ПИД-регулятора в процентах:

$$\Delta K_P = S_P \times K_P \times 100\% = -8\% \times K_P;$$

$$\Delta K_I = S_I \times K_I \times 100\% = 35,29\% \times K_I;$$

$$\Delta K_D = S_D \times K_D \times 100\% = 18,52\% \times K_D.$$

Таким образом, для достижения требуемого качества переходного процесса $u(t)$ необходимо: на 8% уменьшить K_P , на 35% увеличить значение K_I и на 18,5% — K_D .

Для наглядного представления, сравним работу классического ПИД-регулятора и нечеткого супервизорного ПИД-регулятора на реальном объекте. Для исключения искажений результатов в ходе апробации сравниваемых регуляторов возьмем следующее исходное состояние системы управления: выходное давление 0 кг/см² при закрытом положении регулирующего клапана. При исходном состоянии системы управления произведем задание на регулятор уставки выходного давления, равной 12 кг/см². Основным критерием, предъявляемым к данным САУ, является минимальное время достижения заданной уставки, а также минимальное значение перерегулирования при изменяющемся входном давлении. [10].

Параметры классического ПИД-регулятора (при постоянном входном давлении 30 кг/см²) были определены методом Зиглера-Никольса, путем установки K_I и K_D на нулевые значения, K_P было равно 1. Затем была произведена апробация с указанными выше значениями коэффициентов ПИД-регулятора. Если

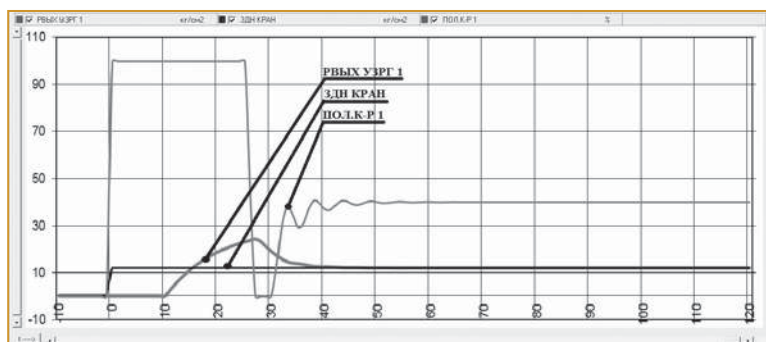


Рис. 7. Графики переходных процессов после настройки регулятора методом Зиглера – Никольса

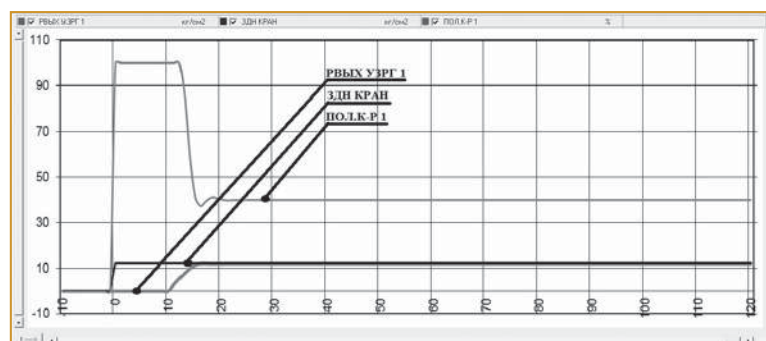


Рис. 8. Графики переходных процессов после настройки регулятора, выполненные экспертным методом

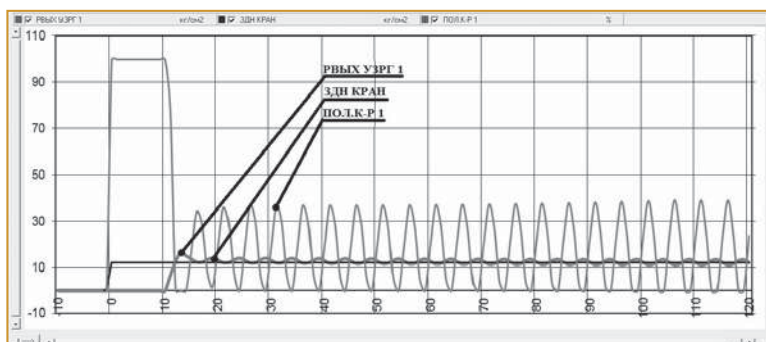


Рис. 9. Графики переходных процессов классического ПИД-регулятора после изменения входного давления

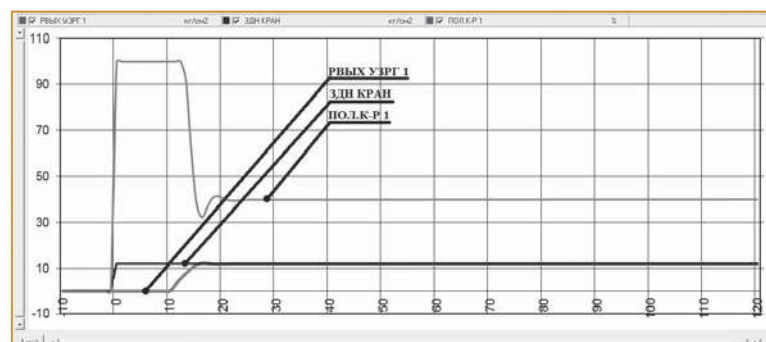


Рис. 10. Графики переходных процессов супервизорного ПИД-регулятора при постоянном входном давлении

в результате данной апробации не возникло незатухающих колебаний, то значение K_{II} увеличивалось на 1. В результате цикла увеличения K_{II} до значения $K_{II}=35$, выходной сигнал контура управления имел незатухающие колебания, при периоде колебаний $T_U=6$ с. Используя данные параметры, с помощью формул из табл. 1 были вычислены следующие коэффициенты: $K_{II}=21$; $K_{II}=7$; $K_D=15,75$.

Графики переходных процессов после настройки регулятора методом Зиглера – Никольса изображены на рис. 7, где изображены следующие тренды:

— РВЫХ УЗРГ 1 — измеренное давление на выходе узла редуцирования давления газа кг/см²;

— ЗДН КРАН — уставка требуемого давления на выходе узла редуцирования давления газа кг/см²;

— ПОЛ.К.Р.1 — положение регулирующего органа 0...100%.

В процессе апробации данные настройки не дали должного качества процесса регулирования, ввиду этого была произведена трудоемкая экспертная настройка с учетом эмпирических данных. Апробация работы САР давления производилась при следующих настройках коэффициентов классического ПИД-регулятора ($K_{II}=13,54$; $K_{II}=0,2585$; $K_D=4,52$). Графики переходных процессов после настройки регулятора, выполненные экспертным методом, изображены на рис. 8.

При изменении входного давления узла редуцирования с 30 кг/см² до 70 кг/см² качество переходного процесса значительно ухудшилось, и коэффициенты ПИД регулятора требовали повторной настройки. Графики переходных процессов классического ПИД-регулятора после изменения входного давления изображены на рис. 9.

Аналогично произведем апробацию работы нечеткого супервизорного ПИД-регулятора при постоянном входном давлении 30 кг/см² (рис. 10), а также после изменения входного давления до 70 кг/см² (рис. 11).

Данный результат (рис. 11) был получен после восьми этапов автоподстройки нечеткого супервизорного ПИД-регулятора. Один этап автоподстройки был ограничен интервалом в 120 с, данный интервал был выбран исходя из экспертных знаний и имел достаточную продолжительность времени для стабилизации переходных процессов. Процесс автоподстройки прекращался, если на трех последних эта-

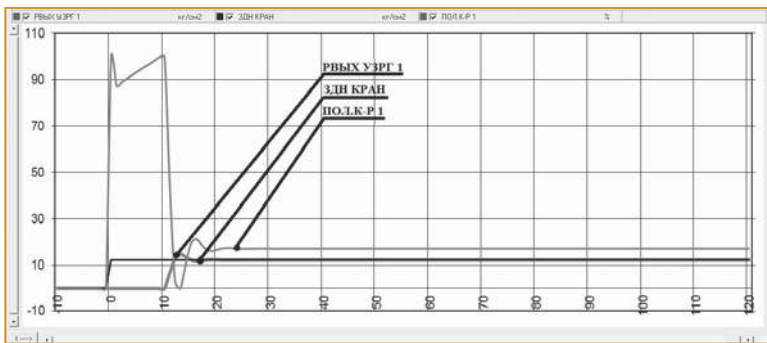


Рис. 11. Графики переходных процессов супервизорного ПИД-регулятора после изменения входного давления

Таблица 3.

№	K_{II}	K_{II}	K_D
1	14,54	0,2519	3,05
2	8,93	0,1441	3,12
3	7,08	0,1318	1,86
4	7,02	0,1269	1,74
5	6,55	0,1292	1,75
6	6,63	0,1307	1,75
7	6,96	0,1262	1,73
8	6,57	0,1223	1,84
9	6,57	0,1223	1,84
10	6,57	0,1223	1,84

пах не происходило улучшения точности подстройки коэффициентов. Изменения коэффициентов супервизорного ПИД-регулятора (рис. 11) в процессе выполнения автоподстройки приведены в табл. 3.

Из графиков переходных процессов видно, что нечеткий супервизорный регулятор (рис. 11) при

подаче задающего воздействия (уставки) в отличие от ПИД-регулятора, использующего классический закон регулирования (рис. 9), оптимальным образом компенсирует возмущающее воздействие и обеспечивает требуемое качество регулирования. Также отметим, что при изменении входного давления суммарное расстояние хода регулирующего органа эквивалентно:

- для классического ПИД-регулятора — 16,83 циклов «открытие — закрытие»;
- для нечеткого супервизорного ПИД-регулятора — 1,53 цикла «открытие — закрытие».

Вывод

Таким образом, подстройка коэффициентов при помощи аппарата нечеткой логики снижает время перерегулирования, позволяет сократить время

переходного процесса, устранить автоколебания, а также повысить робастность ПИД-регулятора. Применение алгоритмов супервизорного управления позволяет значительно повысить качество переходного процесса и расширить функциональные возможности системы. Реализация алгоритмов нечеткого управления по сравнению с классическими позволяет не только добиться требуемого качества управления, но и значительно сократить затраты на текущий и капитальный ремонт оборудования

Список литературы

1. Гуревич Д.Ф., Заринский О.Н., Косых С.И. Трубопроводная арматура с автоматическим управлением. Справочник. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние. С. 1982. 3203.
2. Икусов А.Е. Надежность крановых узлов линейной части газопроводов // Газовая промышленность. 2001. № 6. С. 58-59.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Гостев В.И. Проектирование нечетких регуляторов для систем автоматического управления. БХВ — Петербург. С. 2011. С. 416.
7. Крюков В.В., Тугов В.В. Управление процессом редуцирования газа в магистральных газопроводах // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки». 2019. № 3 (63). С. 35-46.
8. Visioli A. Tuning of PID controllers with fuzzy logic // IEE proc. Control Theory Appl. Vol. 148. No. 1. January 2001.
9. Kanagaraj N. and Sivashanmugam P. An embedded fuzzy controller for real time pressure control // Proceedings of the IEEE Int. conf. on Industrial Technology. 2006. Mumbai, India.
10. Carvajal J., Chen G. and Ogmen H. Fuzzy PID Controller: Design, Analysis, performance evaluation, and stability analysis // Information Sciences. Vol.123, no. 3-4. pp. 249-270, April 2000.

Крюков Владимир Викторович — инженер службы АиМО Оренбургского ЛПУМГ ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург», аспирант Оренбургского государственного университета,
Тугов Виталий Валерьевич — канд. техн. наук, доцент Оренбургского государственного университета.
 E-mail: krykov156@yandex.ru sau@mail.osu.ru

Оформить подписку на журнал "Автоматизация в промышленности" вы можете:
 по электронному каталогу "Почта России" ФГУП Почта России - подписной индекс **П7753**
 • сайт журнала <http://www.avtprom.ru> • Редакция
Адрес редакции: 117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 65, офис 360 Тел.: (495) 334-91-30, (926)212-60-97. E-mail: info@avtprom.ru