

## **НЕЧЕТКОЕ ЦИФРОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ КОМПРЕССОРНОЙ СТАНЦИЕЙ ГАЗОТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ**

---

Рассматривается подход к управлению газоперекачивающими агрегатами компрессорных станций газотранспортной системы с помощью нечетких регуляторов. Предлагается структура системы цифрового управления, основанная на применении внутренних нечетких моделей. В качестве компенсационного регулятора используется инверсная нечеткая модель объекта управления. Приводятся результаты моделирования системы нечеткого управления компрессорной станцией, подтверждающие эффективность применения инверсных нечетких моделей для поддержания максимального или заданного давления газа на выходе компрессорной станции.

### **1. Введение**

В настоящее время при управлении газоснабжением возникают новые технические и экономические задачи, решить которые без создания эффективной системы автоматизированного управления технологическими процессами с применением современных вычислительных средств невозможно.

Конечная цель создания автоматизированной системы управления технологическими процессами транспорта газа состоит в повышении эффективности работы газотранспортной системы за счет оперативного планирования, централизованного контроля и управления режимами работы основных технологических объектов газопровода в реальном времени.

Оптимальный режим эксплуатации магистральных газопроводов определяется работой компрессорных станций. Задачи управления технологическими процессами (ТП) компрессорной станции (КС) состоят в регулировании расхода, давления и температуры газа. Управление газоперекачивающими агрегатами (ГПА) осуществляется автономными автоматическими системами регулирования. Существуют регуляторы давления газа, многоканальные измерители и регуляторы температуры. В настоящее время регулирование осуществляется преимущественно с использованием микроконтроллерных ПИД-регуляторов [1]. Для организации эффективного функционирования систем управления компрессорной станцией целесообразно применять системы с элементами искусственного интеллекта [2]. Модель нечеткого управления компрессорной станцией, как и модель любой системы управления с нечетким описанием параметров, строится на основе формализации субъективных знаний экспертов.

Рассмотрим возможность и целесообразность применения для управления ТП компрессорной станции моделей с нечетким описанием исходных данных и нечетким логическим выводом. Режим работы компрессорной станции зависит от типов, схемы соединения, оборотов ГПА, температуры и состава газа.

Предположим, что существует инверсная система, способная в соответствии с заданной желаемой траекторией вырабатывать управляющий сигнал, который позволяет добиться сходимости управляемого выхода ГПА (заданного давления газа) к желаемой траектории. В этом случае синтез регулятора можно свести к проблеме определения инверсной системы. Идея использования инверсных моделей для класса линейных и нелинейных систем получила развитие в работах [3, 4]. Представляется целесообразным рассмотреть возможность применения нечетких систем Такаги-Сугено в качестве инверсных моделей ТП КС. Однако при наличии неопределенностей и возмущений реализация подобной схемы управления в открытом контуре может привести к низкому качеству работы, синтезируемой системы и даже к неустойчивым режимам. *Целью данной работы* является исследование возможности и целесообразности использования инверсных нечетких компенсационных регуляторов в замкнутых системах цифрового управления с внутренней нечеткой моделью, отражающей динамические свойства технологических процессов компрессорной станции газоперекачивающей системы.

## 2. Принцип инверсного управления с внутренней нечеткой моделью

Определение нелинейной модели объектов цифрового управления может быть трудной задачей, особенно для сложных процессов (в частности, для ТП КС). Альтернатива решению этой проблемы заключается в использовании аппроксимирующих возможностей нечетких систем для представления нелинейных динамических процессов. Синтез регулятора при этом может основываться на инверсии нечеткой модели. При этом может быть использован принцип управления, основанный на структуре с внутренней моделью (ВМ-структуры). Идея применения ВМ-структур получила развитие преимущественно для управления линейными объектами. ВМ-структуру можно преобразовать в эквивалентную ей классическую структуру. В работе [4] показано, что дискретная передаточная функция цифрового регулятора для линейной системы, соответствующего классической структуре, определяется следующим соотношением:

$$R(z) = \frac{Q(z)}{1 - Q(z)G_0(z)}, \quad (1)$$

где  $G_0(z)$  – дискретная передаточная функция модели объекта управления;  $Q(z)$  – дискретная передаточная функция инверсной модели объекта.

Если объект управления является минимально-фазовым, а используемая модель достаточно точной, то регулятор с дискретной передаточной функцией вида (1), обеспечивает устойчивость и приемлемые характеристики качества управления даже при наличии возмущений на входе и выходе управляемого объекта. Это делает привлекательным использование ВМ-структур для создания системы управления ГПА, работающего в условиях постоянно действующих возмущений. Рассмотрим возможность применения нелинейных ВМ-структур с использованием нечетких внутренних моделей объекта управления.

Структура системы инверсного управления с внутренней нечеткой моделью (ИУВНМ) приведена на рис. 1.

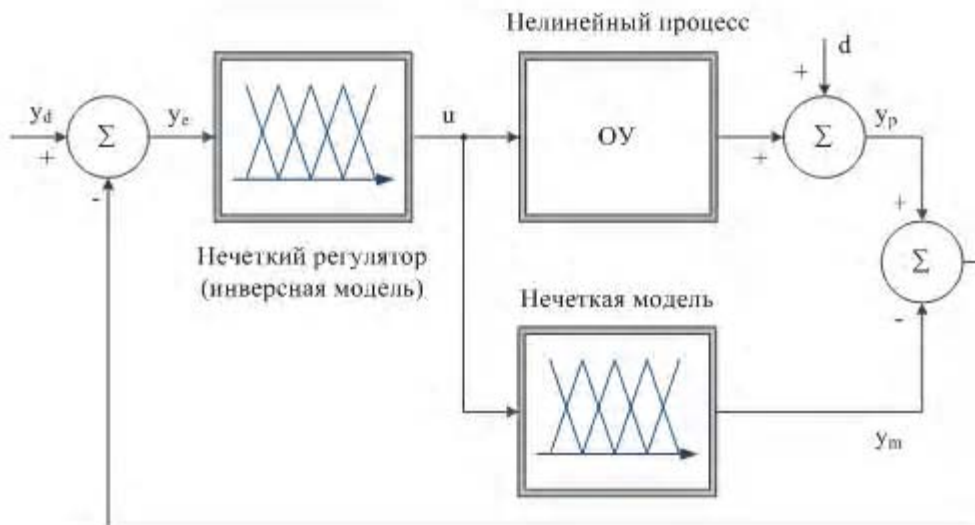


Рис. 1. Система инверсного управления с внутренней нечеткой моделью

Управление  $y_d$ , вырабатываемое компенсационным регулятором (инверсной нечеткой моделью), подается одновременно на процесс и его модель. Сравнение выходов процесса  $y_p$  и модели  $y_m$  позволяет генерировать сигнал ошибки, который используется для изменения входа регулятора  $y_e$  в целях улучшения управления  $u$ . Если модель является идеальным представлением процесса, то сигнал ошибки равен сигналу возмущения  $d$ . В этом случае управляющая структура эквивалентна схеме открытого контура управления. На практике процесс и его модель редко бывают полностью идентичны. В этом случае

обратный сигнал представляет собой сумму сигнала возмущения и ошибки моделирования. Очевидно, при условии устойчивости процесса, если в качестве регулятора выбрана инверсная нечеткая модель, то контур ИУВНМ реализует идеальную передачу задающего сигнала и выхода процесса независимо от объекта. Регулятор, синтезированный по такому принципу, осуществляет качественное управление, несмотря на возмущения. Однако, если ошибка рассогласования выходов модели и процесса является значительной, то возникает опасность потери устойчивости в контуре управления, что вызывает необходимость применения фильтрации сигнала обратной связи для обеспечения определенной робастности по отношению к ошибкам моделирования.

На практике инверсия модели не всегда возможна (например, когда ОУ является неминимально-фазовым). В ряде работ были предложены методы решения этой проблемы. В частности, в [4] предлагается метод частичной инверсии модели. Он состоит в декомпозиции модели на две части, содержащие соответственно устойчивые и неустойчивые нули. В этом случае регулятор выбирается как инверсия устойчивой части исходной модели, а для неустойчивой части используется коэффициент передачи, равный единице.

Рассмотрим подход к инверсному нечеткому управлению нелинейными процессами, основанный на достижении в каждый момент линейности ARMA-модели для каждой элементарной нечеткой ячейки. Преимуществом этого подхода является возможность синтеза регулятора, основанного только на параметрах линейных разностных моделей. При этом модель и ее инверсия (регулятор) являются линейными. В этом случае можно легко анализировать обратимость модели по ее нулям. Метод, используемый для обеспечения линейности каждой элементарной нечеткой ячейки, основан на принципе декомпозиции, подробно рассмотренном в [5].

В соответствии с этим принципом выход, генерируемый каждой элементарной нечеткой подсистемой  $i$ , может быть аппроксимирован линейной системой следующим образом:

$$[y(k+1)]_i = c_0^{(i)} + \sum_{p=1}^n c_p^{(i)} y(k-p+1) + \sum_{q=1}^m d_q^{(i)} u(k-q+1), \quad (2)$$

где  $i \in \{1, \dots, \prod_{p=1}^n (N_p - 1) \times \prod_{q=1}^m (M_q - 1)\}$ ;  $n, m$  – количество строк и столбцов в элементарных ячейках;  $c, d$  – настраиваемые параметры модели.

В этом случае глобальная нечеткая модель аппроксимируется набором линейных систем. Если мы обозначим:

$$C^{(i)}(z) = 1 - \sum_{p=1}^n c_p^{(i)} z^{-p}; \quad D^{(i)}(z) = \sum_{q=1}^m d_q^{(i)} z^{-q+1}, \quad (3)$$

то каждая линейная система может быть представлена в виде:

$$[y(k+1)]_i = \frac{c_0^{(i)}}{C^{(i)}(z)} + \frac{D^{(i)}(z)}{C^{(i)}(z)} u(z). \quad (4)$$

Этот принцип разделения проиллюстрирован на рис.2.

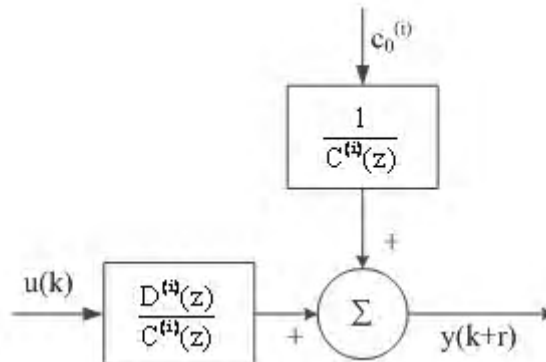


Рис. 2. Иллюстрация принципа разделения блоков элементарной подсистемы

Таким образом, эквивалентная система управления может быть представлена структурой, приведенной на рис. 3. В каждом такте управления для набора  $[y(k), y(k-1), u(k)]$ , определяемого по сформированным заранее функциям принадлежности и базам правил нечеткой системы, активизируется соответствующая линейная подсистема (элементарная нечеткая ячейка). Значение выходного сигнала регулятора формируется по результатам инверсии активизированной элементарной ячейки и применения полученного линейного уравнения (дефаззификации Такаги-Сугено). Для инверсии глобальной нечеткой системы, представленной совокупностью элементарных нечетких подсистем, необходимо осуществить инверсию каждой из этих подсистем. С практической точки зрения важно также определить, все ли подсистемы необходимо инвертировать или некоторые из них можно исключить из рассмотрения. Вычисления по рассмотренному выше алгоритму предполагают, что для каждой подсистемы, содержащей одну входную переменную, известны значения остальных  $(n-1)$  входов. В случае монотонности набора правил решение задачи инверсии является единственным.

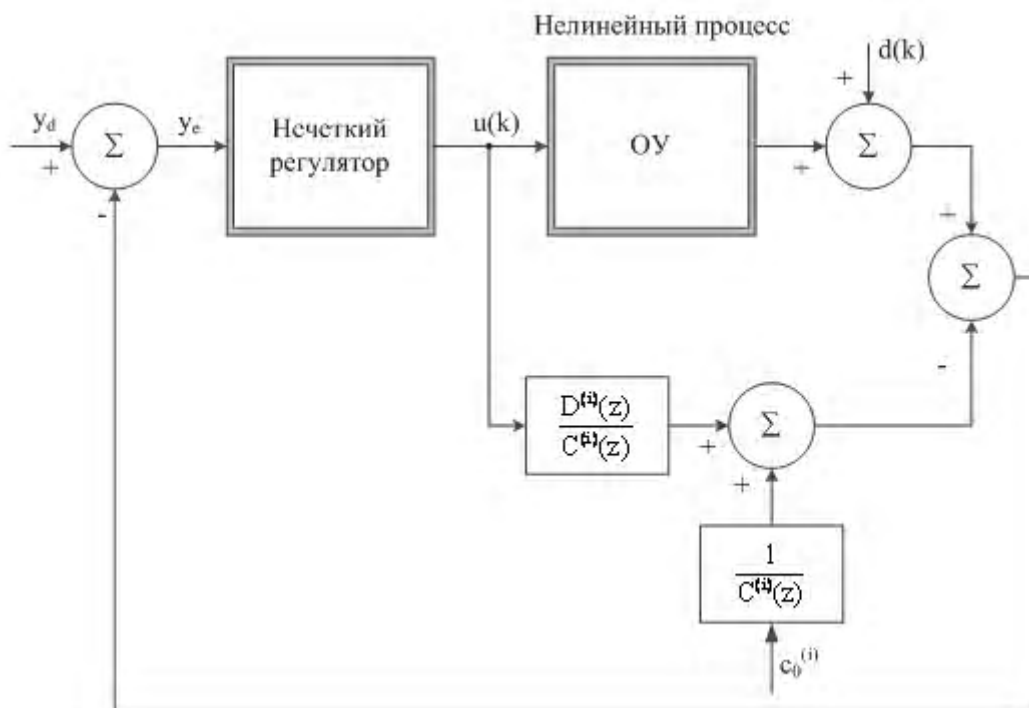


Рис. 3. Эквивалентная схема инверсного управления с внутренней нечеткой моделью

### 3. Моделирование нечеткого цифрового регулятора для управления ГПА

Для моделирования системы нечеткого управления ГПА КС использовались возможности программной среды MATLAB, в частности, пакета для моделирования динамических систем Simulink и пакета синтеза нечетких систем управления Fuzzy Logic Toolbox.

Для разных диапазонов выходного давления (или степени сжатия газа) динамические свойства ГПА могут изменяться (в силу нелинейности статической зависимости по каналу «скорость оборотов вала ГПА – выходное давление»). В связи с этим было проведено разделение общего диапазона изменения выходного давления на 5 интервалов, что позволило после выбора функций принадлежности сформировать 5 линейных подсистем (и, соответственно, 5 элементарных нечетких ячеек). Правила определения выходов для каждой из этих подсистем приведены в таблице.

В соответствии с таблицей структура системы нечеткого управления ГПА КС имеет вид, представленный на рис. 4. Очевидно, что такая структура позволяет в реальном времени после определения текущего состояния системы фиксировать номер элементарной нечеткой ячейки и формировать соответствующее изменение скорости оборотов вала ГПА.

Таблица выходов элементарных подсистем модели ГПА

Номер подсистемы	Элементарная нечеткая ячейка	Выход $y(k+1)$
1	(1,1)	$0,30y(k)+0,999u(k)+1,603$
2	(2,1)	$-0,258y(k)+0,999u(k)+1,078$
3	(3,1)	$-0,574y(k)+0,999u(k)+1,052$
4	(4,1)	$0,193y(k)+0,999u(k)+0,453$
5	(5,1)	$0,158y(k)+0,999u(k)+0,511$

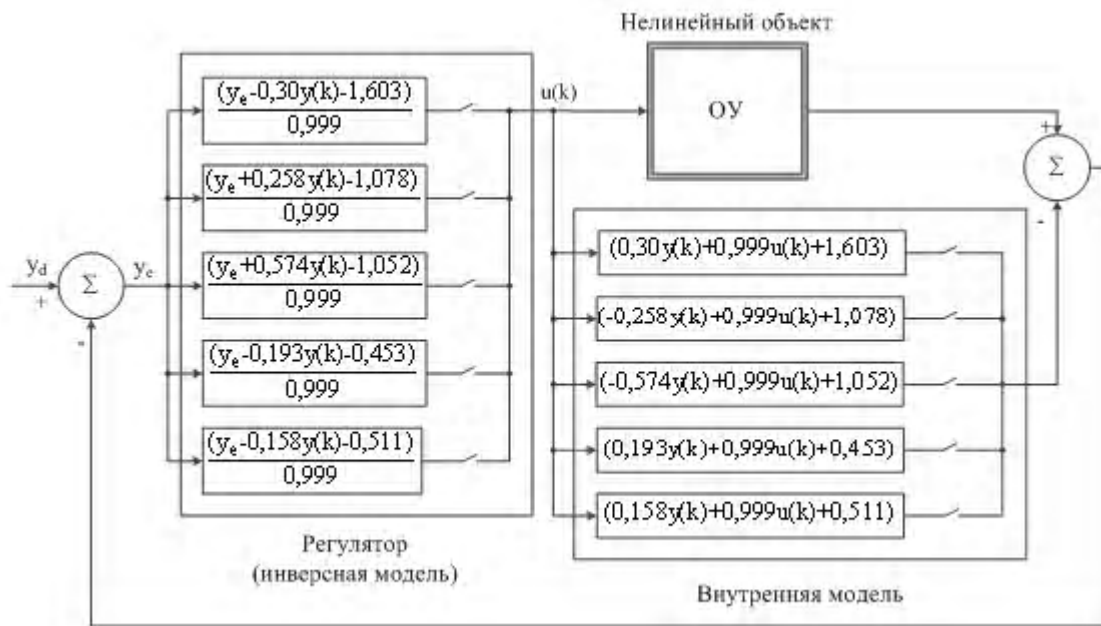


Рис. 4. Структура системы нечеткого управления ГПА с внутренней моделью

Общая схема моделирования системы управления ГПА с нечетким регулятором представлена на рис. 5. В предложенном цифровом SISO-регуляторе реализован описанный выше метод нечеткого управления динамическим процессом, основанный на использовании инверсии внутренней нечеткой модели.

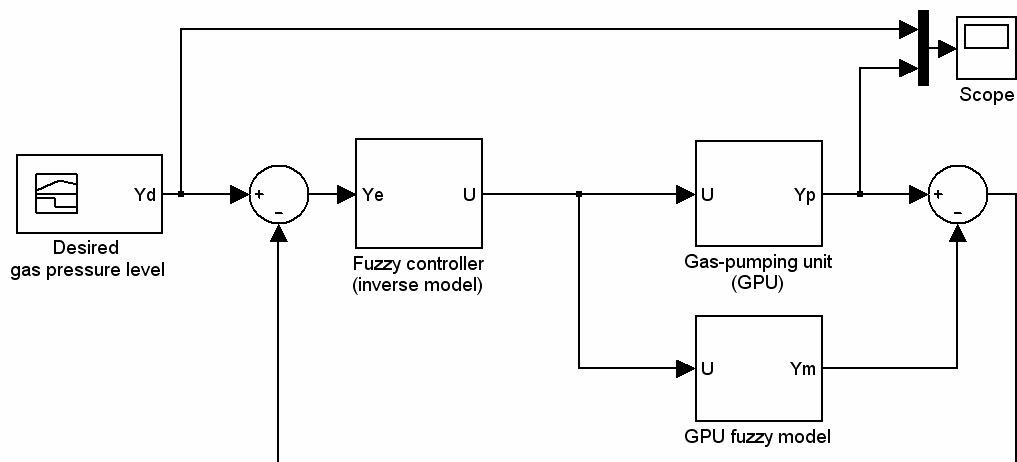


Рис. 5. Схема моделирования системы управления ГПА с нечетким регулятором

На рис. 6 приведены результаты моделирования работы системы при скачкообразном изменении задающего воздействия от 8,0 до 8,5 МПа (диапазон элементарной ячейки (3,1))

и последующем его понижении до 8,0 МПа. Изменение режима работы ГПА осуществляется на верхнем уровне автоматизированной системы управления технологическими процессами КС.

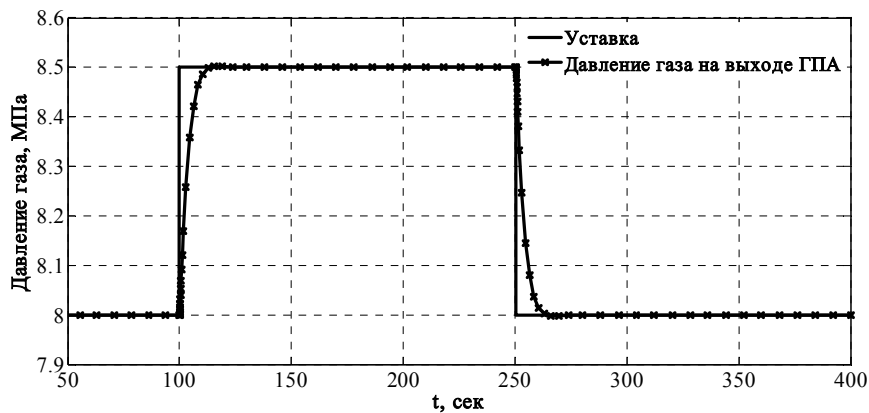


Рис. 6. Результаты моделирования

Результаты моделирования подтверждают работоспособность предложенного нечеткого регулятора в составе системы управления ГПА КС, что свидетельствует о возможности практического использования описанных в данной статье результатов.

#### 4. Выводы

*Научная новизна* полученных результатов заключается в системном подходе к синтезу системы управления ГПА КС с учетом действующих возмущений и существующих ограничений. Предложенный подход к управлению ГПА КС, основанный на применении инверсной внутренней нечеткой модели, состоящей из набора элементарных нечетких ячеек, позволяет синтезировать регулятор, который сохраняет работоспособность в условиях постоянно действующих возмущений как на входе, так и на выходе объекта управления. *Практическая значимость* заключается в теоретическом и экспериментальном подтверждении возможности и целесообразности применения нечетких ВМ-структур для создания систем цифрового управления технологическими процессами компрессорных станций газотранспортной системы. *Перспективным* представляется развитие теоретического обоснования предложенного подхода и тестирование полученных результатов для различных типов возмущений, действующих на газоперекачивающие агрегаты.

**Список литературы:** 1. *Исаков А.Т., Хохлаков М.В., Фланчик Б.С. та ін.* Експлуатація і технічне обслуговування газорозподільних станцій магістральних газопроводів (довідник). Київ: Росток, 2003. 411 с. 2. *Боженюк А.В., Шадрин В.В.* Нечеткая классификация ситуаций и принятие решений в системах магистрального транспорта. // Известия ТРТУ - Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2006. № 10 (65). С. 9-12. 3. *Babuska R., Sousa J., Verbruggen H.V.* Modelbased design of fuzzy control systems. Proceedings of the International Conference EUFIT'95, vol.1. Aachen, Germany. P. 1115-1119. 4. *Пегат А.* Нечеткое моделирование и управление. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. 798с. 5. *Альхайек Р., Удовенко С.Г.* Модифицированный метод построения инверсной нечеткой модели объекта цифрового управления / Системи управління, навігації та зв'язку. 2009. Вип.4(12). С.130–134.

*Поступила в редколлегию 09.03.2011*

**Альхайек Ранем**, аспирант кафедры электронных вычислительных машин ХНУРЭ. Научные интересы: нечеткая идентификация нелинейных систем, нейро-нечеткое управление. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14.

**Удовенко Сергей Григорьевич**, д-р техн. наук, профессор кафедры электронных вычислительных машин ХНУРЭ. Научные интересы: управление стохастическими процессами, методы вычислительного интеллекта. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 70-21-354.

**Шамраев Анатолий Анатольевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры электронных вычислительных машин ХНУРЭ. Научные интересы: нейро-нечеткое управление, разработка и оптимизация микроконтроллерных систем. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 70-21-354.