

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ КОМПРЕССОРНОЙ СТАНЦИЕЙ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА

Рассматривается подход к оптимизации режимов управления компрессорными станциями магистрального газопровода с помощью нечетких моделей, позволяющих эффективно описывать процесс компримирования газа с учетом действующих возмущений и существующих ограничений. Идея заключается в создании модульного имитатора работы автоматизированных систем управления технологическими процессами компрессорной станции, что позволяет повысить качество подготовки операторов-технологов, в диалоговом режиме осуществляющих принятие решений по управлению ТП КС.

1. Введение

Основными объектами оперативного контроля и управления на магистральном газопроводе (МГ) являются:

- головная компрессорная станция и промежуточные компрессорные станции (КС), предназначенные для сообщения головному потоку дополнительной энергии для передачи газа на дальние расстояния. Компрессорные станции, как правило, являются многоцеховыми и оборудованы разнотипными агрегатами. При оперативном управлении на КС осуществляется изменение режимов работы агрегатов, а также подключение или отключение некоторых из них;

- трасса газопровода (участки между КС и отводы), на которой расположены линейные краны и станции электрохимической защиты;

- станции подземного хранения газа, с помощью которых выравнивается загрузка газопровода при суточных и сезонных изменениях потребления газа;

- газораспределительные станции (ГРС), предназначенные для редуцирования давления газа при подаче его потребителям. В настоящее время ГРС относят к автономному объекту управления и в схему оперативного контроля и управления не включают.

Функционирование МГ как сложной непрерывной транспортной системы связано с частыми изменениями в режиме работы управляемых агрегатов, вызванными неравномерностью поставок газа непосредственно с газопромысла, ситуациями на отдельных участках газопровода, нестабильностью в потреблении газа потребителями.

Компрессорная станция как локальный объект управления представляет собой сложный комплекс компрессорного оборудования [1]. На КС предусмотрены различные способы регулирования и управления режимами газопередачи. Одной из главных задач управления технологическим режимом работы КС является поддержание давления на входе КС на заданном уровне при оптимальном (в смысле некоторого критерия) распределении нагрузки между агрегатами. Центральное место в системе управления технологическими процессами занимает оператор-технолог, на долю которого приходится самая ответственная функция – принятие окончательного решения по управлению процессом, а его деятельность протекает в условиях высокой психической напряженности, ответственности и дефицита времени. Наличие пяти основных состояний технологического процесса (норма, отклонение, предавария, авария и катастрофа) требуют от оператора умения выполнения различных функциональных задач, отличающихся целями и критериями эффективности управления.

В иерархии автоматизированных систем управления технологическими процессами компрессорной станции (АСУ ТП КС) выделяют два основных уровня управления:

- верхний интерактивный уровень, предусматривающий выработку оператором-технологом текущих заданий (уставок) для локальных систем управления нижнего уровня. Здесь используются программно-аппаратные средства для оперативного определения режимных параметров ТП КС;

– нижний уровень, объединяющий локальные системы управления, предназначенные для стабилизации работы КС в соответствии с текущими уставками.

Эффективность реализации иерархического управления КС во многом зависит от качества решений, принимаемых оператором-технологом.

Целью данного исследования является разработка методов определения технологических режимов на верхнем уровне АСУ ТП КС. В соответствии с этим необходимо решить следующие задачи: определить последовательность расчета режимов с использованием методов нечеткой оптимизации; разработать структуру модульного имитатора работы АСУ ТП КС, который позволил бы повысить качество подготовки операторов-технологов.

2. Оптимизация технологических режимов в АСУ ТП КС

Рассмотрим задачу оптимизации, заключающуюся в нахождении технологического режима, при котором удовлетворяются требования к ТП компримирования газа. Для того чтобы найти оптимальный (с точки зрения стабильности давления на выходе КС) режим управления, необходимо определить зависимость между выходными и входными параметрами процесса. Основным технологическим объектом КС является газоперекачивающий агрегат (ГПА) с газотурбинным приводом, приводящим в движение центробежный нагнетатель, на котором непосредственно осуществляется компримирование газа.

В общем случае задачу нечеткой оптимизации можно сформулировать как определение входного вектора X , при котором некоторый нечеткий функционал стремится к нечеткому максимуму, т.е.:

$$\tilde{y}^* = \tilde{f}(Y) \rightarrow \max \text{ при } \tilde{\varphi}_i(Y) \subseteq \tilde{X}_i, \tilde{\varphi}_i(Y) \subseteq \tilde{X}_i, \quad (1)$$

где $\tilde{f}$, $\tilde{\varphi}_i$ – нечеткие функции, определенные в m -мерном пространстве действительных чисел; $\tilde{X}_i$ – нечеткие числа.

Задача нечеткой оптимизации компонент вектора выходных параметров Y ТП КС может быть представлена в следующем виде:

$$\tilde{F}(\tilde{y}^1, \tilde{y}^2, \dots, \tilde{y}^r, \tilde{x}_1^1, \tilde{x}_2^1, \dots, \tilde{x}_m^1, \tilde{x}_1^2, \tilde{x}_2^2, \dots, \tilde{x}_m^2, \dots, \tilde{x}_1^r, \tilde{x}_2^r, \dots, \tilde{x}_m^r) \rightarrow \max(\min), \quad (2)$$

здесь нечеткая функция $\tilde{F}(\cdot)$ зависит от компонент вектора выходных параметров Y и компонент вектора входных параметров X ТП КС.

Содержание вектора X , формализующего сведения о параметрах технологического процесса, определяют следующие множества: X_1 – множество, определяющее давление газа на входе КС; X_2 – множество, определяющее температуру газа на входе КС; X_3^i – множество, определяющее давление на входе ГПА; X_4^i – множество, определяющее давление на выходе ГПА; X_5^i – множество, определяющее температуру на входе ГПА; X_6^i – множество, определяющее температуру на выходе ГПА; X_7^i – множество, определяющее количество оборотов ГПА; i – номер ГПА, $i = 1, N$ (N – количество ГПА на КС).

Компоненты вектора выходных параметров Y определяют искомые значения уставок для локальных систем управления нижнего уровня.

Для принятия оператором-технологом решений по оптимизации работы КС необходима информация о нечетких множествах функции (2), определяющих давление газа на входе КС P_1 , давление газа на выходе КС P_2 , температуру газа на входе КС T_1 , температуру газа на выходе ГПА T_2 и количество оборотов ГПА V для каждого момента времени:

$$C[P_m, P_{1i}, P_{2i}, T_{1i}, T_{2i}, V_i, t], \quad i = 1, N. \quad (3)$$

При этом нечеткие множества должны отражать факторы эффективности управления и допустимости расхода газа и соответствующих давлений с позиций увеличения пропускной способности газопровода. Так как цели, ограничения и состояние системы являются нечеткими, множество, соответствующее совокупности данных (3), может быть задано функцией принадлежности следующего вида:

$$\mu_p [P_m, P_{1i}, P_{2i}, T_{1i}, T_{2i}, V_i / t]. \quad (4)$$

В свою очередь нечеткое множество режимов работы i -го ГПА КС должно задавать совокупность частных ограничений и координирующих функций, учитывающих особенности ТП. Для отдельных ГПА функции принадлежности зададим в следующем виде:

$$\mu_p [P_m, P_{1i}, P_{2i}, T_{1i}, T_{2i}, V_i / t] = \mu_1 [P_m, V_i / t] \wedge \mu_2 [P_{1i}, P_{2i}, T_{1i}, T_{2i}, V_i / t] \wedge \mu_3 [P_m, P_{1i}, P_{2i}, T_{1i}, T_{2i}, V_i / t], \quad (5)$$

где $\mu_1 [P_m, V_i / t]$ – функция ограничения режима работы ГПА с учетом возможного разрушения участка МГ или поломки оборудования; $\mu_2 [P_{1i}, P_{2i}, T_{1i}, T_{2i}, V_i / t]$ – функция технологических ограничений режима работы i -го ГПА; $\mu_3 [P_m, P_{1i}, P_{2i}, T_{1i}, T_{2i}, V_i / t]$ – координирующая функция, характеризующая степень принадлежности режима работы i -го ГПА к множеству эффективных режимов, определяемому условиями работы всего МГ.

Определим нечеткие интервалы задания параметров модели. Для этого необходимо иметь информацию о законе распределения параметров $F(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_7)$ на плоскости и взаимном расположении его отдельных фрагментов с площадью d_i , имеющих различные весовые коэффициенты b_i . Будем считать, что для каждой d_i плотность распределения вероятностей постоянна. Тогда поставленную задачу можно свести к поиску максимума функции распределения следующего вида:

$$\varphi(\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n) = \sum_{i=1}^s b_i d_i f(\tilde{x}_{1i}, \Delta x_1; \tilde{x}_{2i}, \Delta x_2; \dots; \tilde{x}_{ni}, \Delta x_n), \quad (6)$$

где n – количество входных параметров.

Предположим, что контролируемые параметры независимы и распределены по нормальному закону, а $b_i = m_{b_i}$ (математическое ожидание весовых коэффициентов). В этом случае для ТП КС функция (6) преобразуется к следующему виду:

$$\varphi(\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_7) = \sum_{i=1}^s m_{b_i} d_i f(\tilde{x}_{1i}, \Delta x_1; \tilde{x}_{2i}, \Delta x_2; \dots; \tilde{x}_{7i}, \Delta x_7). \quad (7)$$

Значения оптимального сдвига координат отдельных фрагментов закона распределения $f(\tilde{x})$ можно определить по методу оптимума номинала [2].

Алгоритмическая процедура формирования $f(\tilde{x})$ задается такой последовательностью операций:

- наблюдаемые значения компонент вектора входных параметров (функции принадлежности) X разбиваем по соответствующим интервалам таким образом, чтобы случайные колебания параметра внутри нечеткого интервала не оказывали существенное влияние на ТП при неизменном давлении на выходе КС. Сужение диапазона случайных изменений входных параметров снижает влияние измеряемых факторов на закон распределения управляющих параметров $f(\tilde{x})$;

- для каждого интервала по статистическим данным определяем соответствующие распределения компонент вектора входных параметров X КС. При этом для каждого значения давления на выходе КС определяется область возможных значений управляющих параметров, ограниченная n -мерным законом распределения компонент вектора входных параметров;

- разбиваем все пространство выходных параметров Y на области, соответствующие различным режимам работы КС.

Оценивая влияние каждой такой области на общую эффективность ТП, можно определить вид и параметры функции $f(\tilde{x})$.

Введем величину h_0 – «степень сжатия», которую будем рассматривать как значение обобщенной лингвистической переменной $\tilde{X} = (\tilde{X}_7^1, \tilde{X}_7^2, \dots, \tilde{X}_7^i)$, заданной на области определения $\tilde{X}_7^1 \times \tilde{X}_7^2 \times \dots \times \tilde{X}_7^i$ и принимающей базовые значения h_{o_k} с функциями принадлежности μ_{o_k} , $k=1, K$, $K = |T_{X_7^1}| \times |T_{X_7^2}| \times \dots \times |T_{X_7^i}|$, где i – количество ГПА в цеху, $\tilde{X}_7^i$ – множество, определяющее количество валов ГПА.

Эффективность режима функционирования КС можно оценить величиной:

$$\varphi = \sum_{i=1}^s b_i d_i f(h_o), \quad (8)$$

где b_i – весовые коэффициенты для ГПА.

Задача оптимизации сводится к определению такого расположения кривой $f(h_o)$, при котором величина φ достигает максимального значения φ_o .

Качество ТП считается удовлетворительным, если давление P_2 находится в диапазоне [9-10] МПа. Для определения значений b_i необходимо задать диапазоны i -х интервалов изменения давления, которые характеризуют чувствительность процесса компримирования газа к изменению степени сжатия h_o . Анализ ретроспективных данных по ТП компримирования газа позволил получить математическую модель процесса в виде линеаризованного уравнения следующего вида:

$$P_{out} = b_0 + b_1 h,$$

где P_{out} – выборочная оценка для давления газа на выходе КС; b_0, b_1 – выборочные оценки для управляющего фактора.

В соответствии с существующими нормами эксплуатации КС с центробежным нагнетателем зададим нулевой уровень степени сжатия равным 1,205. Затем, изменяя с заданным шагом Δh значения степени сжатия в интервале [1,205-1,42], получим данные, необходимые для определения b_0 и b_1 . На рис.1 приведен вид функции принадлежности, аргументом которой является обобщенная лингвистическая переменная «степень сжатия» (h_o) с разбиением диапазона ее изменения на полосы шириной 0,0165.

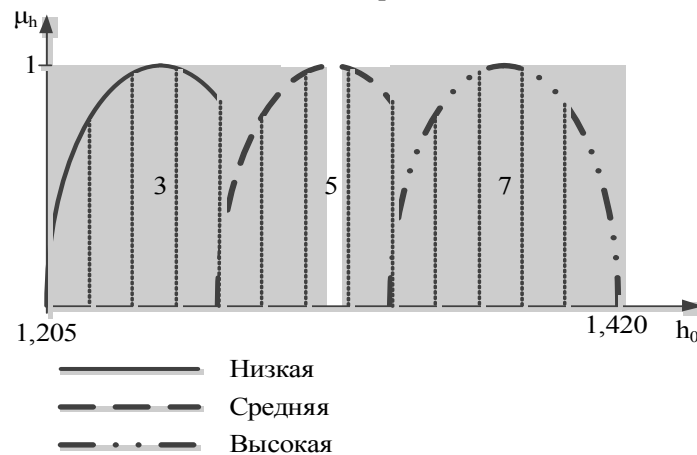


Рис. 1. Функции принадлежности для оценки режимов КС по степени сжатия

Полосы 3, 5, 7 соответствуют максимальным значениям функции принадлежности, однако только при значении степени сжатия, соответствующей полосе 7, на выходе КС будет поддерживаться давление от 9 до 10 МПа. Следовательно, эта полоса имеет большой вес и в относительных единицах оценивается величиной «+1», оставшимся полосам присваиваем в простейшем случае отрицательную оценку «-1». Используя полученные оценки, получаем оптимальные (в смысле критерия (8)) значения степени сжатия газа, гарантирующие эффективные режимы работы КС с поддержанием заданного давления на его выходе.

Следует отметить, что при управлении работой КС кроме задачи поддержания заданного давления на выходе должны быть решены также задачи стабилизации температуры газа на выходе КС и оптимизации расхода газа.

Для выбора оптимального (по расходу топливного газа) планового режима работы КС на интервале управления следует провести оценку эффективности функционирования КС МГ для различных комбинаций включения ГПА с учетом построенных для них функций принадлежности. В качестве оценки эффективности КС можно использовать математическое ожидание суммарных затрат топливного газа на компримирование заданного количества природного газа на интервале управления [5].

Таким образом, задачу оптимизации режимов работы КС МГ можно представить в виде оптимизации функционала (8), дополненную условиями стабилизации температуры газа на выходе КС и оптимизации расхода газа. При этом приоритетным моментом является получение требуемого значения давления газа на выходе КС.

Результаты моделирования подтверждают работоспособность предложенного подхода для оперативного выбора режимов управления ГПА КС.

3. Модульный компьютерный имитатор работы АСУ ТП КС

Разработанная схема модульного компьютерного имитатора автоматизированного управления режимами работы КС тренажерной системы состоит из рабочего места оператора, имитатора режимов и автоматизированной системы обучения оператора. Дисплейный модуль выполняет функции систем отображения информации и средств управления ТП КС. На экран дисплейного модуля выносятся задания, тексты, информация о ходе технологического процесса с изображением мнемосхем, графики и таблицы. Пакет режимной имитации содержит набор подпрограмм для моделирования системы в различных режимах функционирования технологического процесса [2]. Автоматизированная система обучения состоит из генератора заданий, программ контроля и оценки действий обучаемого. Общая модель системы включает в себя модель ТП, модели исполнительных механизмов и преобразователей, а также модель двухуровневой системы автоматизированного управления. Имитатор предусматривает возможность применения для управления ТП КС 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 и задается с использованием описанных выше рекомендаций. В блоке локального регулирования реализованы алгоритмы работы нечеткого цифрового регулятора с инверсной моделью, предложенные в [3] для управления ГПА.

Модель технологического процесса разделяется на три модели по последовательности расчета наблюдаемых технологических переменных процесса (положение исполнительных механизмов – физические выходные переменные процесса – измеренные значения). В ходе моделирования этот блок получает необходимую входную информацию от блока исполнительных механизмов и, таким образом, остается независимым от способов выработки управляющих воздействий. Модель процесса может подвергаться вмешательствам оператора m_4^s , имитирующего неисправности оборудования, изменения внешних условий, свойств сырья. Вырабатываемые физические значения переменных процесса $x=X(v, m_4^s)$ поступают в блок измерения информации для измерения переменных и расчета вспомогательных параметров.

Модель системы исполнительных механизмов получает из блока базового регулирования воздействия (выходы) на клапаны ГПА и дискретные команды по изменению скорости вращения валов ГПА. При этом она может подвергаться вмешательствам оператора m_3^s в целях имитации отказов исполнительных механизмов (клапанов, насосов, переключателей), вырабатывая необходимые для блоков модели ТП и измерения информации значения дискретных и непрерывных исполнительных органов $v=V(u, m_3^s)$. В блок измерения информации поступают выходные физические значения переменных от модели процесса и положения исполнительных механизмов из соответствующего блока (1). Оператор может вмешиваться в работу блока измерения (m_5^s) путем имитации отказов контрольно-измерительной аппаратуры. Вырабатываемые в этом блоке сигналы наблюдений $y=Y(x, v, m_5^s)$ используются в блоках базового регулирования и усовершенствованного управления и передаются для отображения в операторский и инструкторский интерфейсы.

Модель системы управления предложенного имитатора по иерархическому признаку данных разделена на нижний и верхний уровни, соответствующие локальному и режимному управлению. Нижний уровень получает транслируемые операторским диалогом сигналы оператора d_i , выходные сигналы алгоритмов определения уставок для локальных подсистем и фактические значения наблюдаемых переменных. Кроме того (в отличие от реальных систем), работа нижнего уровня системы управления подвержена вмешательствам со стороны инструктора m_1^s , имитирующего отказы автоматики. Вырабатываемые блоком

локального регулирования управления $u=U(d_1, z, y, m_1^s)$ передаются в модель технологического процесса, блок управления режимами ТП КС, диалоговое окно оператора и интерфейс инструктора. В простейшем случае ($z = m_1^s = 0$, d_1 – уставка оператора) задача управления сводится к стандартному регулированию по отклонению.

Верхний уровень системы получает из операторского диалога сигнальные и символьные потоки операторских вмешательств d_2 , d_2^s , управления u , наблюдаемые и вспомогательные переменные y , а также вмешательства инструктора m_2^s . Данный блок вырабатывает сигнальные выходы (уставки, задания и команды для нижнего уровня АСУ ТП КС) $z=Z(d_2, d_2^s, u, y, m_2^s)$ и символьные выходы (данные для оценки технико-экономических показателей, материальные и энергетические балансы, вспомогательные рекомендации).

Центральное место в разработанном имитаторе занимает алгоритм непосредственного обучения оператора за пультом дисплея. Несмотря на разнообразие формулировок учебно-тренировочных задач (УТЗ), весь процесс обучения на тренажере может быть представлен в виде универсального обучающего алгоритма. Под универсальностью алгоритма понимается как возможность его применения в процессе обучения и контроля, так и его использование для обучения любому из заданных классов задач.

Обучающий алгоритм реализован в виде модуля, управляющего диалогом между обучаемым и имитационной моделью. Обучение ведется в терминах проблемной области и включает следующие типы диалога: меню, вопросы, требующие ответа ДА/НЕТ, шаблоны. Выполнение каждого шага диалога сопровождается сообщением на экране дисплея.

Имитатор поддерживает работу в следующих режимах: обучения, подсказки, контроля знаний и исследовательский режим (рис. 2).

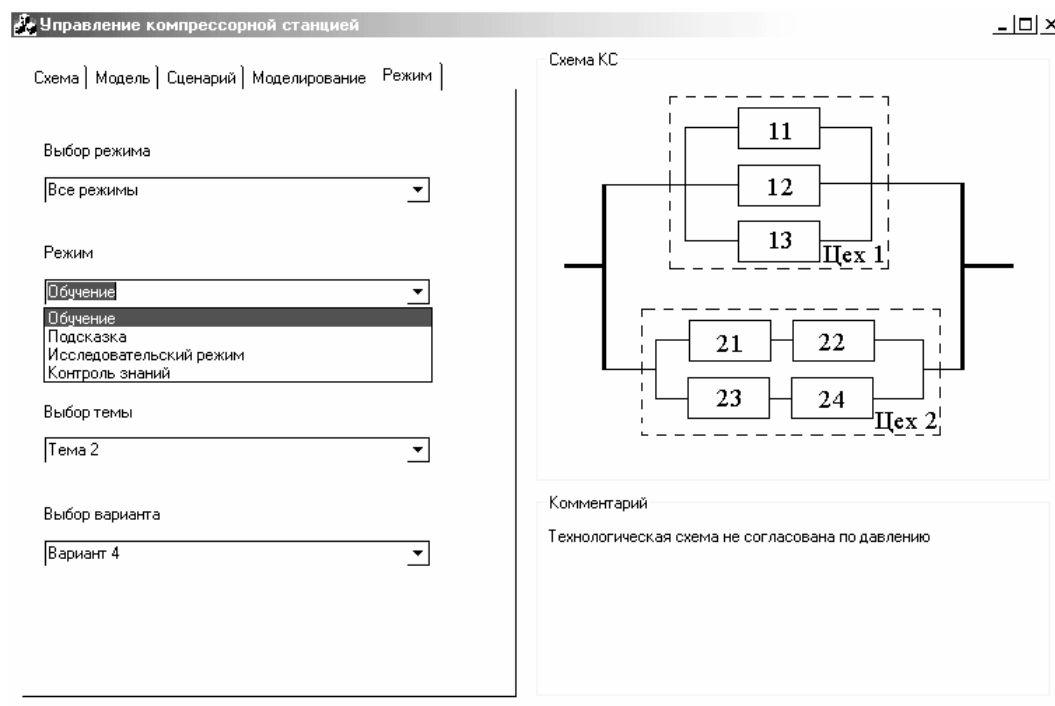


Рис. 2. Выбор режимов работы имитатора автоматизированного управления ТП КС

Режим «обучение» предполагает проведение учебного процесса с оператором, работающим самостоятельно за персональным дисплеем. В этом режиме для реализации конкретной УТЗ оператору предоставляется возможность обращаться за рекомендациями по управлению к модулю подсказок имитатора. Все действия оператора фиксируются в протоколе обучения. В режиме «контроль» подсказки по управлению запрещены.

Режим «исследование» предназначен для имитации в учебных условиях реально возможных ситуаций, позволяющих обучаемым отрабатывать действия, которые в этих ситуациях должны быть предусмотрены. Этот режим ориентирован также на приобретение обучаемыми навыков управления ГТС в условиях, приближенных к реальным, т.е. позволя-

ет работать с реальными объектами, их реальными характеристиками и параметрами. Отметим, что в этом режиме, также как и в режиме «обучение», можно обращаться за рекомендациями по управлению.

После того, как режим работы тренажера определен, осуществляется выбор УТЗ и формирование задания на обучение. Формирование задания, в зависимости от режима работы, заключается в выборе или задании конкретных исходных данных (например, параметров газового потока, технологических ограничений, граничных условий, начальных параметров управления и т.д.). По ходу выполнения задания фиксируется ряд параметров, характеризующих степень подготовленности обучаемого (например, количество нарушений технологических ограничений, количество попыток управления, время, затраченное на обдумывание и принятие управленческих решений и т.д.). Поэтому перед сеансом работы осуществляется обнуление счетчиков указанных параметров.

В имитаторе предусмотрены системные часы, которые фиксируют общее время выполнения задания и время, затраченное на обдумывание и принятие решений. Оператор, изменяя то или иное управляющее воздействие и выбирая цех КС или схему координации ГПА, может уже в исходной ситуации повлиять на режим работы моделируемого объекта. Для этого обучаемому оператору необходимо дать положительный ответ на вопрос об изменении управления.

Если текущий режим работы тренажера – не контроль знаний, то обучаемому предоставляется возможность воспользоваться для решения УТЗ рекомендациями по управлению, которые на основе сложившейся ситуации вырабатывает сам имитатор. Если обучаемый отказывается от подсказки, то управление вновь передается к блоку принятия решений оператором. В противном случае счетчик соответствующей подсказки увеличивается на единицу. На основе анализа ситуаций формируются и выдаются на экран монитора соответствующие рекомендации. Рассмотренный процесс будет повторяться до тех пор, пока задача не будет решена или (в случае контроля знаний) не будет исчерпано время на решение задачи. В том случае, если режим работы тренажера не является исследовательским, то на основе статистики, набранной в ходе выполнения УТЗ, формируется протокол обучения и выдается на экран монитора.

4. Выводы

Научная новизна полученных результатов состоит в совершенствовании методов оптимизации технологических режимов на верхнем уровне АСУ ТП КС с использованием нечетких моделей, позволяющих эффективно описывать процесс компримирования газа с учетом действующих возмущений и существующих ограничений. Эффективность реализации иерархического управления КС во многом зависит от качества решений, принимаемых оператором-технологом.

Практическая значимость заключается в создании модульного имитатора работы АСУ ТП КС, который позволяет повысить качество подготовки операторов-технологов, в диалоговом режиме осуществляющих принятие решений по управлению ТП КС.

Перспективным представляется развитие предложенного подхода с учетом состояния работоспособности оборудования компрессорных станций магистрального газопровода.

Список литературы: 1. *Исаков А.Т., Хохряков 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. *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 12.12.2011

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. 7021354.

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. 7021354.