

## СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ОПЕРАТОРОВ СЛАБОФОРМАЛИЗУЕМЫХ ТП

О.М. Проталинский, И.А. Щербатов

(Астраханский государственный технический университет)

*Для повышения эффективности функционирования слабоформализуемых ТП, интеллектуальная модель которых обладает свойством структурной неопределенности, разработана система поддержки принятия решений (СППР) на основе продукционных баз знаний. В работе описан метод построения интеллектуальных моделей слабоформализуемых процессов и практическая реализация СППР для установки получения серы по методу Клауса.*

*Ключевые слова: интеллектуальная модель, слабоформализуемый процесс, структурная неопределенность, система поддержки принятия решений.*

Особенностями слабоформализуемых процессов являются: наличие неизмеряемых параметров; присутствие большого объема информации, подлежащий обработке для принятия решений по управлению; значительный объем качественной информации. Наличие большого числа взаимосвязанных, взаимовлияющих переменных и отсутствие возможности построения аналитической модели слабоформализуемого процесса обуславливают сложность управления таким процессом.

Слабоформализуемый процесс содержит значительное число неизмеряемых переменных состояния, зачастую оцениваемых оператором на основании своего опыта. Создание СППР для слабоформализуемых процессов требует построения интеллектуальной модели процесса [1], описывающей знания оператора ТП и экспертов предметной области, формализованные с помощью методов искусственного интеллекта.

Описанные особенности слабоформализуемых процессов приводят к существенному увеличению роли оператора при управлении этими процессами. Рост влияния человеческого фактора обуславливает необходимость работы на таких установках либо высококвалифицированных операторов (это требует вложения значительных финансовых средств и нескольких лет подготовки), либо применения СППР, основанных на знаниях и опыте экспертов предметной области. Второй путь является наиболее предпочтительным. Он позволяет тиражировать реализованную СППР для определенного вида процесса.

Цель создания СППР – повышение эффективности принятия решения оператором при управлении слабоформализуемым ТП и снижение степени влияния человеческого фактора на установку.

Для достижения поставленной цели требуется решить ряд задач: интегрировать опыт операторов и экспертов в базу знаний (БЗ) СППР; построить интеллектуальную модель процесса; оценить адекватность интеллектуальной модели; разработать эффективный механизм получения корректного решения.

СППР позволяет использовать знания опытных операторов и экспертов с максимальной эффективностью. Однако реализация СППР приводит к необходимости интеграции их опыта в БЗ и формализации его с помощью методов искусственного интеллекта.

Основа переноса знаний в ЭВМ – это использование текстологических и коммуникативных методов. Они позволяют наиболее полно провести анализ рас-

сматриваемого объекта и получить максимально полную информацию от экспертов, зачастую интуитивно принимающих решения. Процесс принятия решения оператором очень редко может быть выстроен им в строгую последовательность действий, формирующий алгоритм. Поэтому крайне важно на этапе получения знаний использовать комбинацию различных методов извлечения знаний и их формализации.

Следующий этап создания СППР – построение интеллектуальной модели. Слабоформализуемые процессы обладают свойством структурной неопределенности. Описанные выше особенности таких процессов не позволяют построить полную модель процесса, а лишь зафиксировать одну из ее структур, которая отвечает принятым ограничениям и требованиям для решения поставленной задачи.

Для построения интеллектуальной модели процесса использован метод построения диаграмм взаимного влияния факторов (ДВВФ). Последние позволяют графически отразить связи, имеющиеся между измеряемыми и оцениваемыми качественно переменными (факторами).

Структурная неопределенность интеллектуальной модели обусловлена неполнотой исходной информации об объекте управления и наличием нескольких ДВВФ, описывающих ТП. Наличие недостоверных связей между факторами приводит к некорректному представлению объекта с помощью ДВВФ и, как следствие, к построению неадекватной интеллектуальной модели. Диаграммы экспертов дополняют друг друга, а их объединение позволяет получить ДВВФ, наиболее полно отражающую взаимосвязи факторов друг с другом.

Множество элементарных физико-химических процессов, из которых состоит процесс, обозначим  $\{L_q\}$ . Эти процессы могут быть описаны аналитическими или регрессионными моделями, а также с использованием качественной информации. Каждый процесс из этого множества имеет  $N$  входных переменных, представленных множеством  $x \in X^N$ , и  $M$  выходных, представленных множеством  $y \in Y^M$ .

Число экспертов ( $E_x$ ), привлекаемых для анализа ТП и построения ДВВФ, определяется, исходя из возможностей коллектива разработчиков и сложности ТП.

Сформулируем основную задачу построения интеллектуальных моделей процессов, обладающих свойством структурной неопределенности.

На множестве  $\{L_q\}$ , характеризуемом факторами  $F$ , построить ДВВФ  $D(F)$  рассматриваемого ТП, полученную объединением диаграмм  $D(F)_i$ ,  $i = 1...Ex$  каждого эксперта ( $Ex$  – число экспертов предметной области, привлеченных для построения ДВВФ) и обеспечивающую максимум индекса согласованности мнений экспертов  $\chi$ :

$$\chi = \langle L, F, Ex \rangle \rightarrow \max. \quad (1)$$

Для решения поставленной задачи необходима формализация представлений экспертов о ТП в виде ДВВФ. Графическое представление таких диаграмм –  $n$ -уровневая иерархическая структура, где один входной (содержащий входные координаты), один выходной (содержащий выходные координаты) и  $n-2$  промежуточных (содержащие внутрисистемные координаты) уровней.

Множество всех уровней представления рассматриваемой предметной области  $\{L_q\}$ , которые вытекают из анализа ТП как объекта управления и получения трех множеств координат объекта – входного, состояния и выходного представим в виде:

$$L = \{P_1(A_1), P_2(A_2), \dots, P_n(A_n)\} \quad (2)$$

где  $A_1$  – уровень представления множества входных координат, рассматриваемого ТП;  $A_2$  – уровень представления множества выходных координат, рассматриваемого ТП;  $A_3... A_n$  – уровни представления внутрисистемных координат, рассматриваемого ТП;  $P_1...P_n$  – операторы, позволяющие осуществить переход от уровня к уровню.

Задача определения  $\{L_q\}$  состоит из конечного набора структурных элементов диаграммы  $\{O_k\}$ :

$$\forall A_1, \dots, A_n \in \{L_q\}, \exists \{O_k\}, k \leq k_{min}, \quad (3)$$

где  $k_{min}$  – число элементов диаграммы. Каждый уровень имеет конечное число объектов  $aR_l$ ,  $l \leq l_{min}$ , где  $l_{min}$  – число объектов соответствующего уровня. Обе константы  $k_{min}$  и  $l_{min}$  определяются, исходя из анализа  $\{L_q\}$  с использованием коммуникативных и текстологических методов получения экспертных знаний.

Совокупность объектов из одного уровня, имеющих связи с единственным объектом более высокого уровня, будет представлять собой элемент диаграммы взаимного влияния факторов. Такой объект назовем выходным объектом элемента диаграммы, а объекты, из которых в него входят связи, – входными. Этот этап позволяет с помощью графического представления изобразить  $L$ .

После этого необходимо получить матрицу зависимостей  $W_{L_n \rightarrow L_{n-1}} = [w_{ij}]$ , где  $w_{ij}$  отражают степень уверенности экспертов предметной области в наличии связи между объектом  $n$  и  $n-1$  уровня, соответственно, который позволяет исключить некоторые "слабые" связи уже на стадии предварительного анализа.

Число экспертов, привлеченных для решения поставленной задачи, соответствует  $Ex$ . Каждый член этой группы включает в уровни представления  $L$  те объекты, которые отражают его модель, формализо-

ванную с помощью принятой системы обозначений и изображений элементов предметной области. На этом этапе возможны три варианта получения  $w_{ij}$ : бинарные экспертные оценки; экспертные оценки из диапазона  $[0;1]$ ; вербальные экспертные оценки.

По аналогии с лингвистическими переменными, которые используются для описания качественных связей в объекте, формируется терм-множество  $T = \{t_1^*, \dots, t_i^*\}$ , содержащее вербальные оценки уверенности эксперта в наличии связи между факторами. Число элементов терм-множества  $t_i^*$  не ограничено, однако следует использовать 3...5 оценок, а в случае необходимости – термы порождения. Проведенный анализ различных видов функций принадлежности показал, что наиболее эффективным будет использование треугольной функции принадлежности:

$$\mu = \begin{cases} 0, x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, b \leq x \leq c \\ 0, c \leq x \end{cases} \left\{ \begin{array}{l} a = N_0 \\ c = a + \frac{1}{i}(i-1) \\ b = \frac{c-a}{2} \end{array} \right. \quad (4)$$

где  $N_0$  – начальное значение базового множества,  $a \leq b \leq c$ ,  $a, c$  – основание треугольника;  $b$  – вершина треугольника;  $i$  – число термов.

Если эксперт использует термы порождения для оценки степени уверенности в наличии связи между факторами, тогда над функцией принадлежности соответствующего значения лингвистической переменной производится одна из указанных выше операций, которые описаны в [1]. Для получения четкого значения уверенности используется метод центра тяжести [2].

В том случае, если термы порождения экспертом не используются, предлагается применять три стратегии получения точного значения коэффициента уверенности: стратегию минимальной уверенности (в качестве значения коэффициента уверенности принимается значение  $a$ , рассчитанное по (4)), ограниченной уверенности (в качестве значения коэффициента уверенности принимается значение  $b$ , рассчитанное по (4)) и максимальной уверенности (в качестве значения коэффициента уверенности принимается значение  $c$ , рассчитанное по (4)).

Построенные диаграммы  $D(F)_i$ ,  $i = 1...Ex$ , обрабатываются с учетом полученных от экспертов сведений, которые аккумулируются для получения  $D(F)$ . Объекты каждого из  $n$  уровней диаграмм экспертов, участвующих в построении  $D(F)$  объединяются в соответствии с нижеследующим выражением:

$$\{aR_i\}^m = \bigcup_{i=1, Ex} \{aR_i\}_i^m, \quad m = 1..n. \quad (5)$$

В результате получаем исходную "обобщенную" модель  $\{L_q\}$ , где  $i'$  – число объектов вновь образованного  $m$  уровня. Коэффициенты матрицы  $W_{L_n \rightarrow L_{n-1}}$  для  $m$  уровня рассчитываются исходя из зависимости:

$$w_{i,j}^m = \frac{1}{Ex} \sum_{k=1, Ex} (w_{ij}^k)^m, \quad (6)$$

где  $Ex$  – число, участвующих экспертов;  $w_{ij}^k$  – оценка  $k$ -го эксперта относительно наличия связи между объектом  $i$  уровня  $m$  и объектом  $j$  уровня  $m+1$ .

Полученная таким образом исходная обобщенная модель обладает свойством структурной неопределенности. Для разрешения возникшего типа неопределенности введем итеративную процедуру порогового включения связей. Для этого введем пороги включения объекта в соответствующий уровень  $\theta_{i,j}^m \in [0; 1]$ . Если  $w_{i,j}^m \leq \theta_{i,j}^m$ , то связь  $i$ - $j$  разрывается. Подобным образом рассчитываются все веса связей между объектами всех уровней.

Если по окончании процедуры порогового включения останутся "пустые" объекты (не имеющие связей с объектами других уровней), то такие вершины с ДВВФ убираются, а полученная графическая модель  $\{Lq\}$  принимается в качестве исходной "истинной".

Для расчета индекса согласованности мнений экспертов при составлении ДВВФ ТП используется выражение вида:

$$\chi = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \chi_i}{n}, \quad \chi_i = \frac{\sum_{j=1}^{\beta} w_{i,j}}{\beta}, \quad (7)$$

где  $\chi_i$  – индекс согласованности мнений экспертов, полученный для весов связей уровней  $i$  и  $i+1$ ;  $\beta$  – число связей для весов уровней ДВВФ.

Величина индекса согласованности мнений экспертов  $0 < \chi \leq 1$ , значение  $\chi = 1$  соответствует случаю, когда эксперты для построения ДВВФ указали наличие связей между одинаковым набором факторов для каждого из уровней. Чем меньше значение величины  $\chi$ , тем менее согласованными являются мнения экспертов о наличии того или иного фактора, входящего в ДВВФ.

Согласованность мнений экспертов и значение индекса согласованности  $\chi$  напрямую зависит от выбранных значений величин порогов включения связей  $\theta_{i,j}$ ,  $\theta_{j,i}$ . Выбор порогов включения является очень ответственной процедурой, так как определяет адекватность построенной исходной истинной ДВВФ рассматриваемому ТП. При уменьшении значений порогов включения увеличивается число связей на ДВВФ, а значит, увеличивается число параметров, входящих в модель, и вычислительная сложность самой модели. Эти обстоятельства сказываются на скорости проводимых расчетов и невозможности использования такой модели для управления быстротекущим процессом, но это позволит увеличить полноту построенной модели, таким образом выбор  $\theta_{i,j}$ ,  $\theta_{j,i}$  зависит от требуемой полноты модели и необходимой точности расчетов.

При выборе  $\theta_{i,j} = 1$ ,  $\theta_{j,i} = 1$  в ДВВФ попадут только те факторы, связи между которыми имеют вес равный 1, что соответствует  $\chi = 1$ . Варьируя значения порогов для каждого уровня, можно добиться необходимого значения индекса согласованности мнений экспертов. При этом возможно получить близкое к единице значе-

ние  $\chi$  и построить полную в смысле описания модель только для хорошо изученного ТП. Диаграмма процесса, который плохо изучен и обладает высокой неопределенностью, или вновь создаваемого процесса будет содержать связи, имеющие вес отличный от единицы, таким образом, в соответствии с (7)  $\chi < 1$ .

Рассмотрим пример создания СППР для слабоформализуемого ТП со структурно неопределенной моделью на примере процесса получения серы по методу Клауса, обладающего следующими особенностями: плохая измеримость (в каталитическом реакторе измеряется только температура); нестационарность, обусловленная изменением активности катализатора; сильные, трудно компенсируемые возмущения по составу и расходу материальных потоков (кислого газа и воздуха) и высокая чувствительность объекта к этим возмущениям; высокая чувствительность по основному каналу управления (расход воздуха в подогреватель – выход серы из реактора); большое число взаимосвязанных, взаимовлияющих технологических параметров; большой объем информации, подлежащий обработке для принятия решений по управлению; значительный объем качественной информации.

С использованием предложенного метода построена ДВВФ каталитического реактора процесса Клауса, число привлеченных экспертов составило 3 [3]. Для описания степени уверенности экспертов в наличии связи используются бинарные экспертные оценки. Вид диаграммы, представленный на рис. 1, получен в результате обработки соответствующих диаграмм пяти экспертов. В качестве порогов включения были выбраны следующие величины  $\theta_{i,j} = 0,6$  и  $\theta_{j,i} = 1$ , так как они позволили включить в рассмотрение качественные связи между параметрами, определяющими влияние параметров потока и состояния технологического оборудования на активность катализатора АС, засыпанного в реактор.

Рассчитанные индексы согласованности мнений экспертов, полученные для весов связей различных уровней,  $\chi_{K \rightarrow A1} = 0,94$ ,  $\chi_{A1 \rightarrow A2} = 1$ . В соответствии с (7) рассчитан индекс согласованности мнений экспертов при составлении ДВВФ подогревателя технологического газа  $\chi = 0,97$ . Полученное значение  $\chi$  позволяет сделать вывод о достаточно полной изученности процессов, протекающих в каталитическом реакторе. Особенностью ДВВФ является наличие только качественных связей между объектами соответствующих уровней.

На основании построенной обобщенной ДВВФ осуществляется синтез интеллектуальной модели процесса, так как в диаграмме присутствует значительное число качественных связей, аналитическое описание которых затруднено или невозможно.

В соответствии с подходом, описанным в [1], ДВВФ разбивается на соты. Соты в общем случае разделяются на три типа: все связи могут быть описаны аналитическими моделями; все связи описываются интеллектуальными моделями; присутствуют связи как аналитические, так и качественные. Если все связи между факторами диаграммы представлены в виде знаний экс-

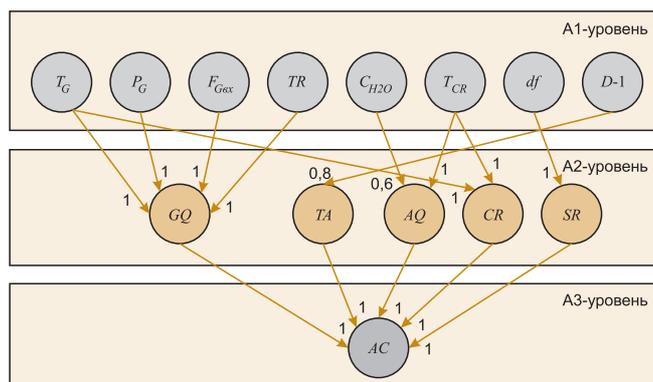


Рис. 1. Диаграмма взаимного влияния факторов для каталитического реактора процесса Клауса,

где  $T_G$ ,  $P_G$ ,  $F_{Gox}$  – температура, давление и расход кислого газа соответственно;  $TR$  – температурный режим в термическом реакторе;  $C_{H_2O}$  – содержание воды в атмосферном воздухе;  $T_{CR}$  – температура в каталитическом реакторе;  $df$  – степень конверсии каталитической стадии;  $D-1$  – выход диаграммы предыдущего аппарата

пертов предметной области, то первый этап процедуры получения производных правил интеллектуальной модели заключается в выделении всех элементарных сот, не допускающих декомпозицию. Для диаграммы, представленной на рис. 1, таких сот будет шесть – "определение качества кислого газа"  $GQ$ ; "определение состояния технологического оборудования"  $TA$ ; "определение качества воздуха"  $AQ$ ; "определение температурного режима в каталитическом реакторе"  $CR$ ; "определение степени регенерации катализатора"  $SR$ ; "определение активности катализатора"  $AC$ .

Затем каждая сота представляется в виде древовидной иерархической структуры, где отображаются значения всех лингвистических переменных, участвующих в ее построении (рис. 2). Связи между значениями переменных изображаются графически. На основании построенной модели формируются производные правила вида "ЕСЛИ ..., ТО ...".

Данные правила являются основой для построения СППР оператора ТП, структура которой представлена на рис. 3. СППР функционирует следующим образом.

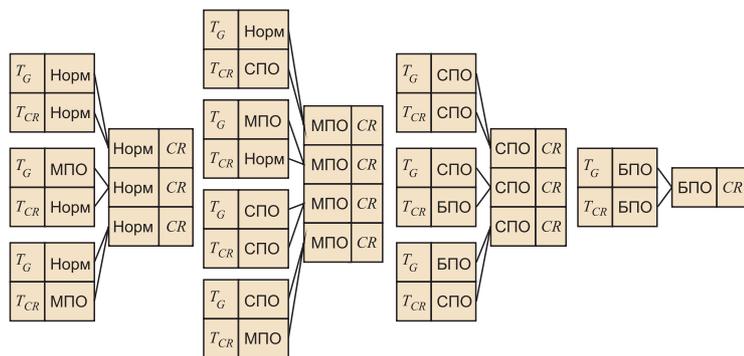


Рис. 2. Древовидная структура элементарных сот базы знаний, где МПО – малое положительное отклонение параметра; СПО – среднее положительное отклонение параметра; БПО – большое положительное отклонение параметра; Норм – нормальное значение параметра

Данные от датчиков поступают для расчета соответствующих параметров в аналитическую модель, в БЗ содержатся производные правила, позволяющие моделировать ход рассуждений оператора.

Описанный выше метод построения ДВВФ ТП позволяет получить значения индексов согласованности мнений экспертов, используемые для формирования веса соответствующих производных правил в базе знаний. Поэтому в модуле выбора управляющего воздействия осуществляется простое ранжирование возможных управляющих воздействий и выбирается то, которое имеет наибольший вес (оно и предъявляется оператору в качестве наилучшего решения), что позволяет значительно сократить время, затрачиваемое оператором на принятие решения.

Для учета свойства нестационарности объекта управления в структуру СППР введен блок коррекции БЗ, который осуществляет проверку правил и проводит процедуру адаптации БЗ. Адаптация правил происходит на основании алгоритмов проверки на неполноту, противоречивость и избыточность, а также расчетного показателя приоритета правил, описанных в [1].

Одним из самых существенных возмущающих воздействий является "проскок" тяжелых углеводородов с установки аминовой очистки. Это возмущение оказывает воздействие на объект 5...6 раз в сутки. В этом режиме установка находится до 1% общего времени работы. В некоторых случаях данные о "проскоке" поступают к оператору, но в том случае, если такая информация недоступна, возмущение возможно определить по специфической реакции приборов измерения температуры, давления и расхода кислого газа. Тяжелые углеводороды, поступающие в каталитический реактор, быстро и необратимо снижают активность катализатора. Управление осуществляется в ручном режиме, когда оператор увеличивает расход воздуха в подогреватель для сжигания избытка углеводородов и окисления их до  $CO_2$  с целью минимизации негативного влияния вредных примесей на катализатор.

Чтобы снизить вред, наносимый катализатору в результате неправильных действий оператора, создана СППР, которая решает задачу выработки требуемого значения управляющего воздействия (расход воздуха в подогреватель) с учетом стехиометрического соотношения воздух/кислый газ (рис. 3).

На выходе СППР формируется оценка сложившейся ситуации на объекте и степени угрозы катализатору. Ввиду кратковременности возмущающих воздействий, необратимо снижающих активность катализатора, формируются рекомендации по управлению, исходя из максимизации степени конверсии установки или минимизации вредного влияния на катализатор. В качестве совета оператору предъявляется одно решение, однако существует возможность просмотра всего множества решений, ранжированных по убыванию веса.

Для оценки эффективности применения СППР сравним функционирование объекта в двух режимах: ручное управление и управление с применением предложенной СППР.

В первом случае будут возникать потери, которые вызваны изменением входных дрейфующих координат. Величина отклонения от "идеального" значения  $\xi_1$  этого режима выразится соотношением

$$\xi_1 = \int_0^{\tau_m} (I_1 - I^*)^2 dt, \quad (8)$$

где  $\tau_m$  – время, в течение которого проводилось имитационное моделирование;  $I_1$  – выбросы вредных соединений в атмосферу при ручном управлении во время "проскока";  $I^*$  – выбросы вредных соединений в атмосферу при "идеальном" управлении.

При применении предложенной СППР также будут возникать потери по сравнению с "идеальным" управлением, вызванные неточностью математической модели объекта. Таким образом, отклонение выбросов вредных соединений в атмосферу с использованием СППР выразится соотношением

$$\xi_2 = \int_0^{\tau_m} (I_2 - I^*)^2 dt, \quad (9)$$

где  $I_2$  – значение критерия при использовании СППР.

Тогда степень повышения эффективности функционирования объекта управления  $\Theta$  будет определяться соотношением

$$\Theta = \xi_1 / \xi_2 \cdot 100\%. \quad (10)$$

Здесь  $\Theta$  – эффективность ведения процесса ручного управления по сравнению с применением СППР. Эту величину легко получить для объекта с уже действующей системой управления на Астраханском ГПЗ.

Система имитационного моделирования для оценки эффективности использования СППР состоит из генератора входных координат и имитационной модели объекта. Генератор входных координат объекта формирует последовательность значений входных координат, полученных обработкой реализаций этих координат на действующих производствах. В качестве имитационной модели объекта управления используется построенное математическое описание.

*Проталинский Олег Мирославович* – д-р. техн. наук, проф., проректор по информатизации,  
*Щербатов Иван Анатольевич* – доцент кафедры "Вычислительная техника и электроника"  
Астраханского государственного технического университета.

Контактный телефон (8512) 61-44-49. E-mail: prot@astu.org / sherbatov2004@mail.ru

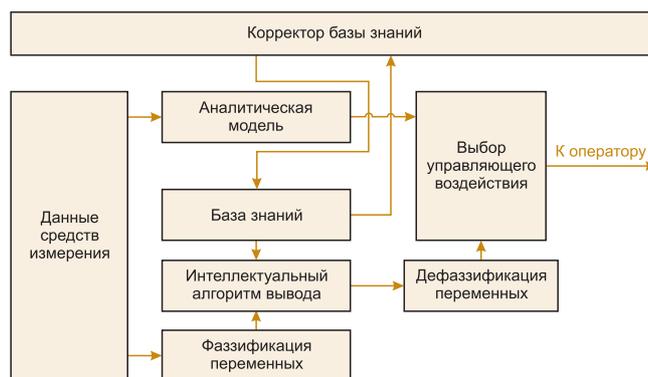


Рис. 3. Структура СППР

Режим ручного управления имитируется подачей постоянных управляющих воздействий, равных рекомендуемым в нормативной документации (как правило, эти значения найдены опытным путем и достаточно близки к оптимальным при средних значениях входных координат и переменных состояниях), так как это делается на действующей установке. Если информация в нормативной документации отсутствует, в качестве постоянных управлений принимают средние их значения из области допустимых управлений.

В качестве критерия  $I^*$ , который является "идеальным", примем теоретически возможное минимальное значение выбросов серосодержащих соединений в атмосферу, равное 1,9%. Расчет критериев осуществляется за время  $\tau_m$  работы генератора входных координат. Имитировался период времени, равный 36 мес.

Для задачи оценки эффективности работы СППР проводилось имитационное исследование эффективности для установки У-251 Астраханского ГПЗ по данным ЦЗЛ завода и института АНИПИГаз. Полученные результаты свидетельствуют об увеличении срока эксплуатации катализатора установки на 5%.

#### Список литературы.

1. *Проталинский О.М.* Применение методов искусственного интеллекта при автоматизации технологических процессов: Моногр. Астрахан. Гос. Техн. Ун.-т. Астрахань: Изд. АГТУ, 2004.
2. *Голубков Е.П.* Технология принятия управленческих решений. Издательство: ДиС. 2005.
3. *Щербатов И.А., Проталинский О.М., Мичуров Ю.И.* Гибридная модель каталитического реактора процесса Клауса // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. техн. науки. 2005. №2.

#### Оформить подписку на журнал "Автоматизация в промышленности" вы можете:

- в России – в любом почтовом отделении по каталогу "Газеты. Журналы" агентства "Роспечать" (подписной индекс **81874**) или по каталогу "Пресса России" (подписной индекс **39206**).
- в странах СНГ и дальнего зарубежья – напрямую или через подписные агентства-партнеры ЗАО "МК-Периодика" ([www.periodicals.ru](http://www.periodicals.ru))

Все желающие, вне зависимости от места расположения, могут оформить подписку, начиная с любого номера, прислав заявку в редакцию или заполнив анкету на сайте [www.avtprom.ru](http://www.avtprom.ru)  
В редакции также имеются экземпляры журналов за прошлые годы.