



ФОРМАЛИЗАЦИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЯВНЫХ И НЕЯВНЫХ ЭКСПЕРТНЫХ ЗНАНИЙ ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

к.т.н., доц. Спесивцев Александр Васильевич

Санкт-Петербург
08 февраля 2019 года

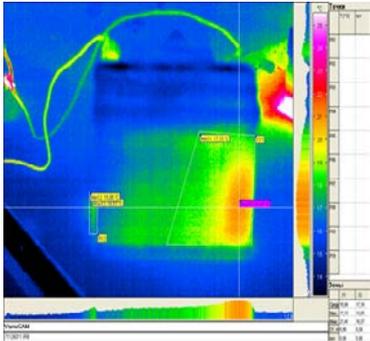
Цель исследования: разработка методологических и методических основ построения и использования моделей, методов и алгоритмов оценивания состояния сложных объектов на основе извлечения, обработки и анализа явных и неявных экспертных знаний для повышения оперативности и обоснованности принятия управленческих решений, связанных с функционированием указанных объектов в условиях неопределенности.

Основные научно-технические задачи:

1. Системный анализ существующих и перспективных подходов и формализации решения проблемы разработки научно-методического обеспечения методов и моделей оценивания состояния СЛО на основе экспертных знаний в условиях неопределенности.
2. Разработать концепцию оценивания состояния СЛО на основе явных и неявных экспертных знаний.
3. Разработать методологические и методические основы построения и использования класса логико-лингвистических моделей, базирующихся на новых формах представления нечетких чисел и дополнительных арифметических действий над ними и включающих в себя:
 - 3.1 Разработку методов формализованного представления явных и неявных экспертных знаний аналитическими выражениями, описываемыми нечеткими лингвистическими переменными и логико-лингвистическими моделями.
 - 3.2. Разработку методики представления *агрегированного (обобщенного) состояния* СЛО на основе экспертных знаний.
4. Разработка метода логического вывода в многомерных пространствах нечетких переменных.
5. Проведение экспериментальных исследований с разработанными логико-лингвистическими моделями и методами оценивания состояния СЛО.

Анализ и формализация проблемы оценивания состояния сложных объектов на основе явных и неявных экспертных знаний

Особенности сложных объектов (СЛО) :



- СЛО обладают свойствами многофункциональности, распределенности, унификации, наличием подсистем и связей;
- наличие контуров отрицательной и положительной обратной связи;
- динамика, нелинейность и непредсказуемость поведения СЛО;
- масштабы последствий деструктивных воздействий трудно предсказуемы;
- принятие решений о состоянии СЛО часто осуществляется в условиях жесткого лимита времени, рисков и различных ограничений на возможности выбора и реализации управляющих воздействий и т.п.;
- вместе с количественной информация о функционировании СЛО содержит элементы нечеткости, неопределенности;



Примеры СЛО, приводящие к необходимости использования явных и неявных экспертных знаний(ЭЗ):

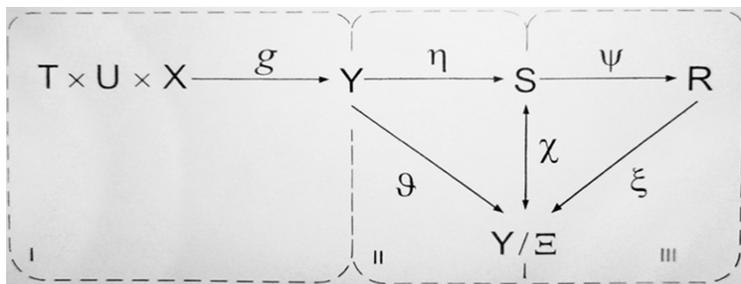
- системы управления функционированием различных классов систем (промышленных, логистических, космических, сельскохозяйственных и т.п.);
- автоматизированные и автоматические системы управления производством различных отраслей;
- современные информационно-диагностические системы управления технологическими процессами.

♦ Обобщенное описание и постановка решаемой проблемы (1)

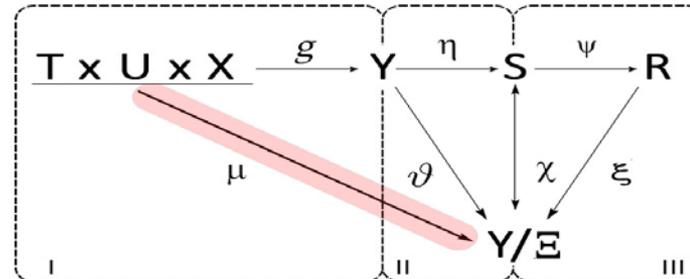
♦ Дано:

- ♦ T – множество моментов времени t , в которые наблюдается объект;
- ♦ U, Y – множества входных U и выходных Y воздействий соответственно;
- ♦ Y/Ξ – фактор-множество состояний СлО;
- ♦ S – пространство шкал измерения входных и выходных воздействий;
- ♦ X – множество состояний x объекта, характеризуемое в каждый момент времени $t \in T$ набором переменных $x_k, k = 1, s$;
- ♦ R – множество возможных корректировок решений о состоянии СлО посредством отображений ψ и ξ ;
- ♦ g – оператор выходов, описывающий механизм (формулы, алгоритмы) формирования выходного воздействия Y ;
- ♦ η – оператор шкалирования;
- ♦ $\vartheta = \eta \circ \chi: Y \rightarrow Y/\Xi$ - композиция отношений в задаче диагностирования состояния СлО.

Необходимо: представить коммутативную диаграмму реализации процесса выработки и принятия решения о состоянии СлО на основе явных и неявных экспертных знаний.



Типовая технология процесса выработки и принятия решения о состоянии СлО на накопленных данных (ЭКСТЕНСИОНАЛ – по Д. Поспелову)



Предлагаемая технология выработки и принятия решения о состоянии СлО на основе явных и неявных экспертных знаний (ИНТЕНСИОНАЛ – по Д. Поспелову)

Раскрытие неопределенности состояния СлО на основе явных и неявных экспертных знаний, позволяющих конструктивно сформировать следующее отображение:

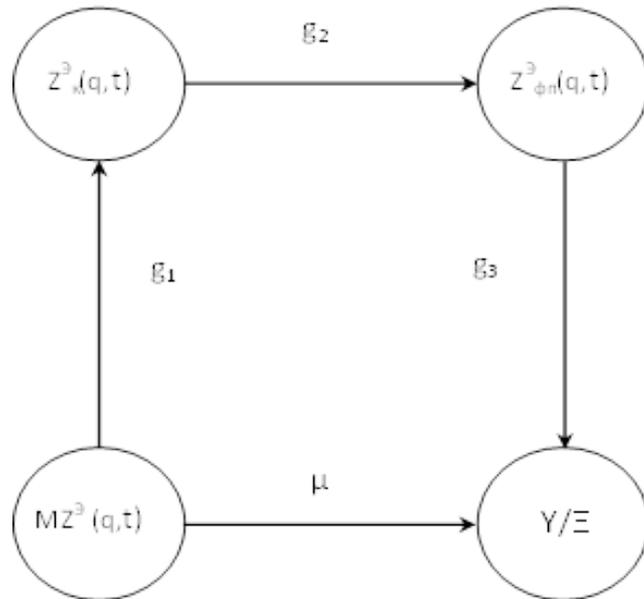
$$♦ \mu: T \times U \times X \rightarrow Y/\Xi$$

Обобщенное описание и постановка решаемой проблемы (2)

Дано: метазнания $MZ^3(q,t)$ эксперта, включающих профессиональные $Z^3_{пр}(q,t)$ и неявные $Z^3_{н}(q,t)$ знания о состоянии конкретного СЛО.

Требуется: преобразовать явные и неявные метазнания эксперта к виду, удобному для компьютерной обработки.

- Для формирования отображения $\mu: T \times U \times X \rightarrow Y/\Xi$ может быть предложена коммутативная схема, представляющая последовательность взаимосвязанных процессов *извлечения, представления и формализации* явных и неявных экспертных знаний. При этом само отображение представляется композицией представленных отношений



$$\mu = g_1 \circ g_2 \circ g_3, \quad \text{где}$$

- g_1 – отношение *извлечения* множества факторов $Z^3_{н}(q,t)$ из метазнаний $MZ^3(q,t)$ эксперта, включающих профессиональные $Z^3_{пр}(q,t)$ и $Z^3_{н}(q,t)$ неявные знания для решения задачи о состоянии конкретного СЛО;
- g_2 – отношение *представления* факторов $Z^3_{н}(q,t)$ в виде лингвистических переменных и формирование факторного пространства $Z^3_{фн}(q,t)$, в котором эксперт принимает решение о состоянии СЛО в конкретной задаче;
- g_3 – отношение *формализации* экспертных знаний в виде полиномиального выражения на множестве лингвистических продукционных правил факторного пространства $Z^3_{фн}(q,t)$ с диагностированием состояния СЛО на фактор-множестве Y/Ξ .

• Научной новизной является выделение отношений извлечения, представления и формализации знаний при работе с экспертом. При этом отображение явных и неявных экспертных знаний является композицией выделенных отношений.

Обобщенное описание и постановка решаемой проблемы (3)

Решение задач извлечения, представления и формализации явных и неявных экспертных знаний для оценивания состояния СЛО в теоретико-множественной постановке можно представить моделью:

$$\diamond \langle X, \Phi_z, E_{znp}, F_z, M_z, MZ^{\exists}(q,t), Z^{\exists}_{np}(q,t,\mu); Z^{\exists}_n(q,t, \mu); Z^{\exists}_{comp}(q,t,\mu); K; Y/\Xi \rangle,$$

X – множество состояний СЛО, которые в ходе распознавания должны быть отнесены к одному из классов;

Φ_z – множество методов извлечения знаний;

E_{znp} – множество методов представления знаний;

F_z – множество методов и алгоритмов формализации знаний;

M_z – множество условий, необходимых для выполнения всех операций при построении моделей;

$MZ^{\exists}(q,t)$ – метазнания эксперта, включающие явные профессиональные $Z^{\exists}_{np}(q,t, \mu)$, неявные $Z^{\exists}_n(q,t, \mu)$ и знания в сопредельных областях

$Z^{\exists}_{comp}(q,t, \mu)$ для решения задачи о состоянии конкретного СЛО;

K – множество показателей качества решения задач оценивания состояния СЛО;

Y/Ξ – множество классов состояния СЛО, к одному из которых следует отнести результат определения.

Таким образом, предмет исследования состоит в разработке модельно-алгоритмического обеспечения решения задач оценивания состояния СЛО на основе формализации, обработки и анализа явных и неявных экспертных знаний.

Перечень необходимых подзадач для решения проблемы представлен на следующем слайде.

ЗАДАЧИ КОМПЛЕКСНОГО АГРЕГИРОВАНИЯ ЯВНЫХ И НЕЯВНЫХ ЭКСПЕРТНЫХ ЗНАНИЙ ПРИ ОЦЕНИВАНИИ СОСТОЯНИЯ СЛО НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКО-ВОЗМОЖНОГО ПОДХОДА

Задачи извлечения экспертных знаний (Задачи класса А)

А1. Извлечение концептов факторного пространства для моделирования состояния СЛО и отношений между ними

А2. Выбор и обоснование вербально-числовых шкал для лингвистических переменных

А3. Разработка методики извлечения ЭЗ по состоянию конкретного СЛО с учетом особенностей его эксплуатации

Задачи представления экспертных знаний (Задачи класса Б)

Б1. Разработка новых форм задания нечетких чисел (LR)-типа и дополнительных арифметические операции над массивами нечетких чисел для сохранения первоначальной нечеткости

Б2. Представление экспертных знаний лингвистическими переменными и нечеткими продукционными правилами на их основе

Б3. Определение нечеткой метрики различия состояния СЛО в многомерных нечетких пространствах нечетких чисел (LR)-типа

Б4. Построения алгоритмов нечеткого вывода в пространствах лингвистических переменных с применением (LR)-аппроксимации

Задачи формализации экспертных знаний (Задачи класса В)

В1. Разработка методики подготовки нечеткой экспертной информации и применение методов теории планирования экспериментов

В2. Разработка критериев оценивания степени адекватности модели знаниям эксперта и действительному состоянию СЛО

В3. Разработка методик определения количества членов разложения полинома для получения гарантированной точности в условиях неопределенности

В4. Разработка методики формализации экспертных знаний в виде логико-лингвистических моделей

Задачи использования экспертных знаний (Задачи класса Г)

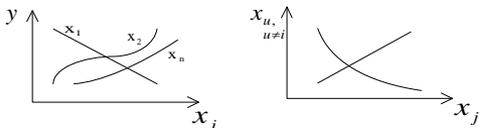
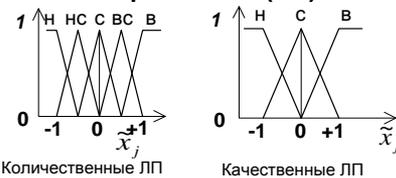
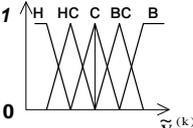
Г1. Разработка методик построения однопараметрических и многопараметрических ЛЛМ состояния конкретных СЛО

Г2. Разработка методического обеспечения оценивания качества разработанного модельно-алгоритмического аппарата

Г3. Создание методик извлечения качественно новой информации на основе анализа полученных моделей о функционировании СЛО

Г4. Использование полученных моделей как БЗ при построении ИАСУ ТП в условиях неопределенности

Сравнительный анализ содержания и технологий имитационного и нечётко-лингвистического подходов к построению модели СЛО

	Данные для построения математических моделей	Подготовка данных для планированного эксперимента	Задание матрицы плана
Существующий имитационно-стохастический подход	<p align="center">Экспериментальные данные</p>  <p> $X_{ij} \in [X_{ij}^{\min}, X_{ij}^{\max}]$, - независимые переменные $j = \overline{1, n}$ - количество входных переменных $i = \overline{1, N}$ - количество наблюдений $\vec{y}^{(k)} = (y_1^{(k)}, \dots, y_N^{(k)})^T$ - вектор наблюдений $k = \overline{1, K}$ - количество выходных переменных </p>	<p>Кодирование</p> <p> $X_j^{(0)} = \frac{X_j^{\max} + X_j^{\min}}{2}$ - основной уровень $H_j = \frac{X_j^{\max} - X_j^{\min}}{2}$ - интервал варьирования $X_{ij} \in \{X_j^{\min}, X_j^{\max}\}$ $x_{ij} = \frac{X_{ij} - X_j^{(0)}}{H_j} \in \{-1, +1\}$ - значение кодированной переменной в матрице планирования экспериментов </p>	<p align="center"> $\overset{\circ}{X} = \left\ \overset{\circ}{x}_{ij} \right\ _{N \times n}$ </p> <p>Свойство ортогональности матрицы</p> $\sum_{i=1}^N x_{ij} = 0$ $\sum_{i=1}^N x_{iu} x_{is} = 0, \quad u, s = \overline{1, n}, u \neq s$ $\sum_{i=1}^N x_{ij}^2 = N$
Содержание и новизна предлагаемого подхода	<p>Потребовалось:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Ввести новую стандартизированную форму представления нечеткого числа (LR)-типа. (Задача Б1) 2. Обобщить дополнительные арифметические операции для сохранения исходного уровня нечеткости и точного решения нечетких уравнений. (Задача Б1) 3. Представить экспертные знания лингвистическими переменными и нечёткими продукционными правилами (Задача Б2, В1) 	<p>Использованы:</p> <ul style="list-style-type: none"> - дополнительные арифметические операции для получения четких границ на концах интервала задания лингвистических переменных; (Задача Б2) - полученные формулы для оценки нечеткого расстояния; (Задача Б3) - введенная нечеткая метрика на множестве нечетких чисел (LR)-типа; (Задача Б3) - нечеткие лингвистические шкалы в n-мерном метрическом пространстве. (Задача А2) 	<p>Использованы:</p> <ul style="list-style-type: none"> - дополнительные арифметические операции для сохранения первоначальной нечеткости зависимой переменной; (Задача Б1) - ортогональность и ротатабельность матрицы планированного эксперимента нечетких высказываний Эксперта в виде нечётких продукционных правил. (Задача А2, Б2).
Предлагаемый нечётко-лингвистический подход и построение модели СЛО	<p>Представление экспертных знаний в виде лингвистических переменных (ЛП)</p> <p>входные переменные \tilde{X}_j :</p>  <p>Количественные ЛП Качественные ЛП</p> <p>выходные переменные $\tilde{Y}^{(k)}$:</p>  <p>Шкала лингвистических значений: Н – нижнее, НС – ниже среднего, С – среднее, ВС – выше среднего, В – высокое</p>	<p>Подготовка ЛП для построения опросной матрицы</p> <p>Кодирование</p> <p> $\tilde{X}_j^{(0)} = \frac{\tilde{X}_j^{\min} \oplus \tilde{X}_j^{\max}}{2}$ - основной уровень $\tilde{H}_j = \frac{\tilde{X}_j^{\max} \ominus \tilde{X}_j^{\min}}{2}$ - интервал варьирования $\tilde{X}_{ij} \in \{\tilde{X}_j^{\min}, \tilde{X}_j^{\max}\}$ $x_{ij} = \frac{\tilde{X}_{ij} \ominus \tilde{X}_j^{(0)}}{\tilde{H}_j}; x_{ij} \in \{-1, 1\}$ </p>	<p align="center">Матрица опроса эксперта в пространстве нечетких ЛП</p> $U^k = \left\ \tilde{x}_{ij} \right\ $ <p>для которой необходимо выполнение условий ортогональности</p> $\sum_{i=1}^N \tilde{x}_{ij} = 0;$ $\sum_{i=1}^N \tilde{x}_{iu} \otimes \tilde{x}_{is} = 0, \quad u, s = \overline{1, n}, u \neq s$ $\sum_{i=1}^N \tilde{x}_{ij}^2 = N$

Сравнительный анализ содержания и технологий имитационного и нечётко-лингвистического подходов к построению модели СЛО

	Построение функции отклика	Расчетная модель выходных переменных	Интерпретация результатов
Существующий имитационно-статистический подход	$\sum_{i=1}^N (y_i^{(k)} - \hat{y}_i^{(k)}(\bar{x}, \bar{b}_r^{(k)}))^2 \rightarrow \min$ $\hat{y}_i^{(k)}(\bar{x}, \bar{b}_r^{(k)})$ - расчетное значение выходной переменной по уравнению со значимыми коэффициентами $\bar{b}_r^{(k)} = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ir} y_i^{(k)}}{N}$ $r = 0, m -$ количество коэффициентов аппроксимирующего полинома	$y^{(k)} = b_0 + \sum_{j=1}^n b_j^{(k)} x_j + \sum_{j<u<n} b_{ju}^{(k)} x_j x_u + \dots$ $+ b^{(k)}_{12\dots n} x_1 x_2 \dots x_n$ <p>по расчетной матрице</p> $\bar{X} = \begin{pmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & \dots & x_{mn} \end{pmatrix}_{N \times m}$ <p>$m = n+p$, p - количество нелинейных коэффициентов</p> $t = \frac{b_m}{s_{b_m}}$ <p>где s_{b_m} - ошибка определения коэффициентов.</p> <p>Значимость коэффициентов – по t-критерию Стьюдента.</p>	$\bar{y} = \bar{f}(\bar{x}, \bar{b}_0, \bar{b}_1, \dots, \bar{b}_n, \bar{b}_{12}, \dots)$ $\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_r)$ $r = 1, m$ <p>Вещественные переменные, задающие факторное пространство функционирования объекта</p> <p>Коэффициенты, отражающие специфику математической формализации исследуемого объекта</p> <p align="center">Процедурный путь использования данных – экстенционал (по Д. Поспелову)</p>
Содержание и новизна предлагаемого подхода	<ol style="list-style-type: none"> Решение нечетких уравнений в пространстве дополнительных арифметических операций. Развитие понятия нечеткого метрического n-мерного пространства. (Задача Б3) 	<ol style="list-style-type: none"> Разработка алгоритма аппроксимации неявных экспертных знаний аналитической функцией в многомерном пространстве нечетких лингвистических переменных. (Задача В1, В4) Разработка критериев значимости и достоверности нечеткой модели. (Задача В2, В3) 	<ol style="list-style-type: none"> Определение степени адекватности модели с использованием мер возможности и необходимости. Введение меры «полезности» модели: (Задача Г3) $0.5d(A_{\bar{y}}) < \sum_{r=1}^m b_r^{(k)}$ m – количество значимых коэффициентов аппроксимирующего полинома, $d(A_{\bar{y}})$ – коэффициент нечеткости выходной переменной.
Предлагаемый нечётко-лингвистический подход	$\sum_{i=1}^N (\tilde{y}_i^{(k)} - \hat{\tilde{y}}_i^{(k)})^2 \rightarrow \min$ $\hat{\tilde{y}}_i^{(k)}$ – расчетное значение нечеткой выходной переменной со значимыми коэффициентами аппроксимирующего полинома $\tilde{b}_r = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ir} \otimes \hat{\tilde{y}}_i^{(k)}}{N}$ $r = 1, m -$ количество коэффициентов аппроксимирующего полинома	$\tilde{y}^{(k)} = \tilde{b}_0 + \sum_{j=1}^n \tilde{b}_j^{(k)} \tilde{x}_j + \sum_{j<u<n} \tilde{b}_{ju}^{(k)} \tilde{x}_j \tilde{x}_u + \dots$ $+ \tilde{b}^{(k)}_{12\dots n} \tilde{x}_1 \tilde{x}_2 \dots \tilde{x}_n$ $\tilde{X} = \begin{pmatrix} \tilde{x}_{11} & \dots & \tilde{x}_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ \tilde{x}_{m1} & \dots & \tilde{x}_{mn} \end{pmatrix}_{N \times n}$ <p>Построение модели на основе использования сформированных критериев значимости и количества членов разложения полинома, аппроксимирующего неявные знания Эксперта об изучаемом объекте.</p>	$\tilde{y} = \tilde{f}(\tilde{x}, \tilde{b}_0, \tilde{b}_1, \dots, \tilde{b}_n, \tilde{b}_{12}, \dots)$ $\tilde{x} = (\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_r), r = 1, m$ <p>Нечеткие переменные, задающие факторное пространство функционирования объекта на основе экспертных знаний.</p> <p>Коэффициенты, отражающие знания, опыт и интуицию эксперта применительно к функционированию объекта.</p> <p align="center">Декларативный путь использования знаний – интенционал (по Д. Поспелову)</p>

ДАНЫ: Метазнания эксперта для принятия решений о состоянии конкретного СЛО. – $MZ^{\exists}(q,t,\mu)$

ТРЕБУЕТСЯ: Из метазнаний извлечь множество концептов, выделить наиболее существенные и составить факторное пространство концептов и отношений между ними для моделирования состояния СЛО на основе явных и неявных знаний.

Шаг 1. Сформировать на основе множества концептов $Z^{\exists}_k(q,t,\mu)$ из метазнаний $MZ^{\exists}(q,t,\mu)$ эксперта, включающих явные профессиональные $Z^{\exists}_{пр}(q,t,\mu)$, сопредельные $Z^{\exists}_{сопр}(q,t,\mu)$ и неявные $Z^{\exists}_н(q,t,\mu)$ знания и используемые в дальнейшем для решения задачи о состоянии конкретного СЛО пространство концептов. Выделяют как качественные так и количественные переменные, описывающие компоненты.

Шаг 2. Описать пределы изменения концептов оппозиционными шкалами в допустимых пределах функционирования СЛО.

Шаг 3. Сформировать и обосновать факторное пространство из выбранного пространства концептов для решения конкретной задачи о состоянии СЛО, удовлетворяющее требованиям системности в описании СЛО, достаточности факторов (7 ± 2), измеряемости (количественной и/или органолептической), понятного физического смысла и т.д.

Шаг 4. Создать вербально-числовые таблицы для соотнесения словесных признаков концептов количественным показателям (отнесение к соответствующим интервалам признаков).

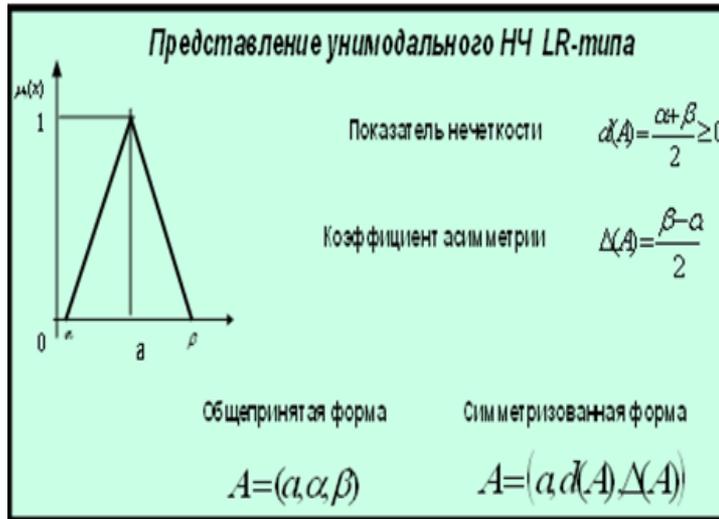
Новым в данном случае является выделение отношения извлечения знаний при работе с экспертом. Методика, иными словами, заключается в том, «ЧТО» спрашивать у эксперта, а также определяет порядок выполнения определенных требований, заставляя эксперта мыслить о состоянии СЛО системно.

• **Задачи класса Б - 1. Представление экспертных знаний**

Разработка новых форм задания нечетких чисел (LR)-типа и дополнительных арифметические операции над массивами нечетких чисел для сохранения первоначальной нечеткости (1)

ДАНО: множество концептов, составляющих факторное пространство для описания состояния СлО.

ТРЕБУЕТСЯ: разработать новую симметризованную форму задания нечетких чисел (LR)-типа и арифметических операций над ними, облегчающую дальнейшее представление и использование вербальной экспертной информации в виде лингвистических переменных.



$$A = (a, d(A), \Delta(A)) \quad B = (b, d(B), \Delta(B))$$

$$A \otimes B = (ab, |a|d(B) + |b|d(A), a\Delta(B) + b\Delta(A)) =$$

$$\left\{ \begin{array}{l} (a, \alpha, \beta)_{LR} \otimes (b, \gamma, \delta)_{LR} = (ab, a\gamma + b\alpha, a\delta + b\beta)_{LR}, a > 0, b > 0; \\ (a, \alpha, \beta)_{LR} \otimes (b, \gamma, \delta)_{LR} = (ab, -b\beta - a\delta, -b\alpha - a\gamma)_{LR}, a < 0, b < 0; \\ (a, \alpha, \beta)_{LR} \otimes (b, \gamma, \delta)_{LR} = (ab, b\alpha - a\delta, b\beta - a\gamma)_{LR}, a < 0, b > 0; \end{array} \right.$$

• **Арифметические операции при симметризованной форме представления нечетких чисел**

$$A \oplus B = (a + b, d(A) + d(B), \Delta(A) + \Delta(B)),$$

$$A \ominus B = (a - b, d(A) + d(B), \Delta(A) - \Delta(B)),$$

$$A \otimes B = (ab, |a|d(B) + |b|d(A), a\Delta(B) + b\Delta(A)),$$

$$A \oslash B = \left(\frac{a}{b}, \frac{|a|d(B) + |b|d(A)}{b^2}, \frac{b\Delta(A) - a\Delta(B)}{b^2} \right),$$

Научная новизна состоит в том, что введение симметризованной формы представления нечеткого числа (LR)-типа позволило разработать арифметические операции, нечувствительные к знаку нечетких чисел, что существенно облегчает работу с массивами нечетких чисел.

Разработка новых форм задания нечетких чисел (LR)-типа и дополнительных арифметических операций над массивами нечетких чисел для сохранения первоначальной нечеткости (2)

ДАНО: A, B и C – нечеткие числа (LR)-типа, заданные в симметризованной форме.

ТРЕБУЕТСЯ: доопределить арифметические операции над нечеткими числами (LR)-типа, удовлетворяющими требованию сохранения исходной нечеткости.

Определение. Дополнительной арифметической операцией называется такая операция, что

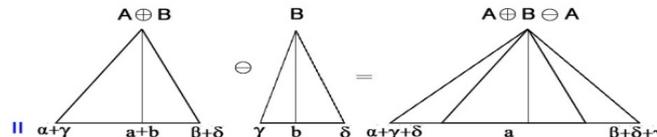
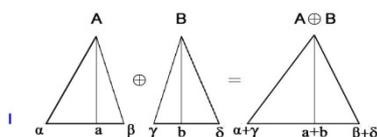
$$C = A * B \rightarrow C * B = \overset{\text{доп}}{A},$$

*

доп - обозначение дополнительной операции, противоположной к *

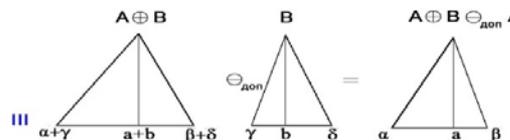
♦ **Результат сложения-вычитания двух нечетких чисел в общепринятой форме арифметических операций:**

$$(A + B) - B = (a + b - b, \alpha + \gamma + \delta, \beta + \delta + \gamma) = (a, \alpha + \gamma + \delta, \beta + \delta + \gamma)$$



♦ **В форме дополнительных арифметических операций $(A+B) \ominus_{\text{доп}} B$**

$$= (a + b - b, d(A) + d(B) - d(B), \Delta(A) + \Delta(B) - \Delta(B)) = (a, d(A), \Delta(A)) = (a, \alpha, \beta)$$



Научной новизной является то, что дополнительные арифметические операции предотвращают возрастание нечеткости при обработке массивов нечетких чисел (LR)-типа в условиях знакопеременного ряда применительно к теории планирования экспериментов.

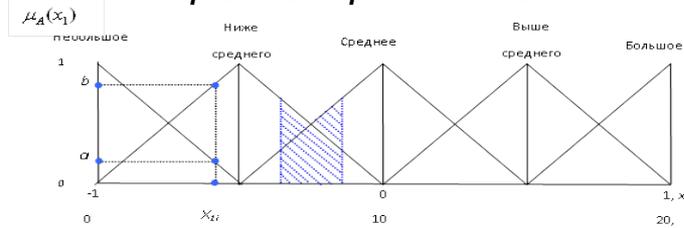
Представление экспертных знаний лингвистическими переменными и нечеткими продукционными правилами на их основе

ДАНО: множество концептов, составляющих факторное пространство для описания состояния Сло..

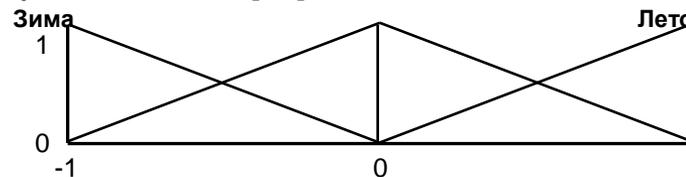
ТРЕБУЕТСЯ: разработать вид лингвистических переменных как форму представления вербальной явной и неявной экспертной информации с учетом терм-множеств в виде нечетких чисел (LR)-типа для последующего применения, анализа и компьютерной обработки.

Например, в задаче определения возможности возникновения дефектов металлооблицовки стартового комплекса после пуска РКН экспертом выделены следующие факторы: количество пусков, конструктивная схема, толщина листов металлооблицовки, марка стали листов, класс РКН, климатические условия. Количественные и качественные факт в виде лингвистических переменных представлены ниже.

оры



- ♦ Определение шкал количественной лингвистической переменной (например, количество пусков РКН).
- ♦ Ось абсцисс: вверху – лингвистическая (вербальная) шкала;
- ♦ внизу – числовая шкала в натуральных физических единицах;
- ♦ числовые значения в стандартизованном масштабе [-1,+1].
- ♦ Ось ординат: - функция принадлежности, [0,1]



- ♦ Качественная (неколичественная) лингвистическая переменная (например – климатические условия).

Научный результат: набор нечетких лингвистических переменных факторного пространства составляет нечеткие лингвистические продукционные правила имплицативного типа «Если....., то...» как представление явных и неявных экспертных знаний для описания ситуаций при оценивании состояния конкретного Сло.

Формализация экспертных знаний

ДАНО: множество нечетких продукционных правил в лингвистическом виде как отражение явных и неявных экспертных знаний для оценивания состояния СлО, полученного в результате решения задач классов А и Б.

ТРЕБУЕТСЯ: выбрать и обосновать применимость метода формализации явных и неявных экспертных знаний, допускающего сокращение общего количества продукционных правил, их систематизацию и построение аналитического выражения.

Сформулируем основные предпосылки к обоснованию применения методов теории планирования экспериментов к формализации множества лингвистических продукционных правил логико-лингвистическими моделями.

1. Теория планирования экспериментов задает структуру множества лингвистических продукционных правил и обуславливает формализацию явных и неявных экспертных знаний в виде полиномиального выражения.
2. Полный факторный эксперимент или дробные реплики от него составляют матрицы опроса с минимальным количеством обращений к эксперту, причем каждая строка матрицы представлена лингвистическим продукционным правилом, отражающим явные и неявные экспертные данные о состоянии СлО в конкретной ситуации.
3. Ортогональность матриц планирования первой степени обуславливает независимость коэффициентов при каждой из переменных в стандартизованном виде полиномиального разложения, а ротатабельность – одинаковость ошибок определения по всему факторному пространству.
4. Полученное аналитическое выражение является отражением явных и неявных экспертных знаний об изучаемом явлении или состоянии СлО.

Научная новизна состоит в том, что указанные предпосылки позволяют формализовать явные и неявные экспертные знания, представленные набором лингвистических переменных, при минимуме обращений к эксперту аналитическим выражением. Это дает возможность тиражирования и сохранения опыта и знаний ведущих специалистов в удобном для компьютерной обработки виде..

Разработка критериев оценивания степени адекватности модели знаниям эксперта и действительному состоянию СЛО (задачи В2 и В3)

ДАНО: Полное полиномиальное разложение, содержащее избыточное количество членов разложения (задача В4).

ТРЕБУЕТСЯ: Сократить количество членов разложения с сохранением при расчетах точность не ниже исходной нечеткости путем модификации известных и разработки новых методов применительно к оцениванию состояния СЛО

Сформулируем несколько критериев, применение которых способствует сохранению качества вычислений по полиномиальному выражению при уменьшении количества его членов разложения.

1. Оценивание степени адекватности расчетов по модели экспертным знаниям проводится по остаточной дисперсии

$$S^2_{ост} = (Y_{i\text{эксп}} - Y_{i\text{расч}})^2 / (N - f), \text{ где } N - \text{ количество продукционных правил опроса (строк матрицы);}$$

$$f - \text{ число налагаемых связей (количество учитываемых коэффициентов полинома).}$$

Уменьшение f приводит к росту остаточной дисперсии и среднего квадратического $S_{ост}$. Исключая наименьшие по модулю коэффициенты разложения, снижаем их количество до тех пор, пока $S_{ост} <$ исходной нечеткости. Оставшиеся коэффициенты считаем значимыми.

2. Визуализация степени близости расчетов по модели экспертным оценкам проводится по корреляционному полю (рис.1). Рассеяние точек относительно теоретической линии регрессии характеризуется коэффициентом корреляции.

Аналогично проводится процедура оценки адекватности экспериментальным данным.

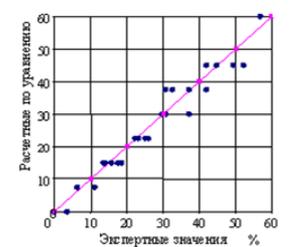
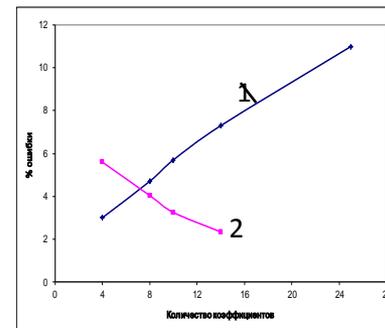


Рис.1

3. Оценивание модели по разработанному критерию информативности $0,5d(A_r) < \sum_{i=1}^n |b_i|$ где $0,5d(A_r)$ – показатель нечеткости Y , b_i – все значимые коэффициенты модели без b_0 .

4. Критерий выбора достаточного количества членов разложения аппроксимирующего полинома в многомерном пространстве вербальных нечетких переменных (разработка автора).

Полиномиальное разложение можно рассматривать с двух независимых позиций: математической и метрологической. Тогда можно вычислять остаточные ошибки по полиномиальному разложению и по формуле определения ошибок косвенных измерений. Поведение остаточных ошибок при увеличении количества коэффициентов разложения графически изображено на рис.2. Точка пересечения является компромиссной и определяющей количество членов разложения полинома, удовлетворяющим обеим точка зрения.



•Рис.2. – Поведение линий тенденций: 1 – метрологической; 2 – математической

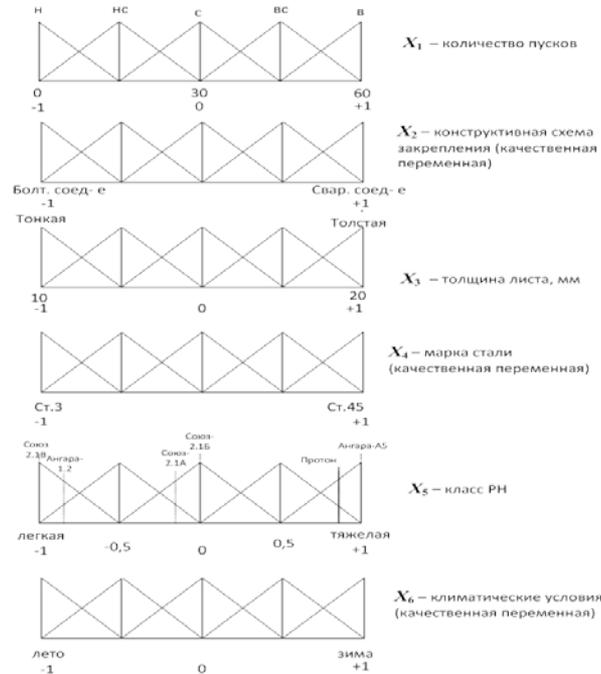
Пример построения логико-лингвистической модели на основе явных и неявных экспертных знаний (1)

Задачи классов А и Б

Шкала арифметизации вербальных признаков состояния металлооблицовки числовыми значениями

Интервалы	Мода	Обозначение	Косвенные признаки изменения состояния
Низкий 0,25 и ниже	0,10	Н	Конструктивные элементы металлооблицовки не имеют явных дефектов и повреждений. Эксплуатационные характеристики, конструктивная схема и прочностные характеристики металла полностью соответствуют эксплуатационной документации.
Ниже среднего 0,10 – 0,40	0,25	НС	Основные конструктивные элементы металлооблицовки не имеют явно выраженных дефектов и повреждений. Отмечаются незначительные дефекты листов металлооблицовки. Эксплуатационные характеристики, конструктивная схема и прочностные характеристики металла соответствуют эксплуатационной документации.
Средний 0,25 – 0,55	0,40	С	Основные конструктивные элементы металлооблицовки имеют отдельные дефекты, не оказывающие влияние на использование металлооблицовки стартового сооружения по назначению и (или) на ее долговечность. Проведение РВР не требуется.
Выше среднего 0,40 – 0,70	0,55	ВС	Отмечаются дефекты, оказывающие влияние на использование металлооблицовки СК по назначению и (или) на ее долговечность. Наблюдаются деформации и разрушения. Проведение РВР в значительных объемах.
Высокий 0,55 и выше	0,70	В	Отмечаются дефекты, при наличии которых использование металлооблицовки СК невозможно или исключается из-за несоответствия требованиям безопасности или надежности. Проведение РВР металлооблицовки стартового сооружения в значительном объеме.

Представление концептов факторного пространства лингвистическими переменными



Y – возможность появления деформаций листов металлооблицовки стартового сооружения

Пример продукционного правила:

«ЕСЛИ количество пусков X_1 «низкое» и конструктивная схема X_2 «сварное соединение» и X_3 толщина металлооблицовки «тонкая» и X_4 марка стали «сталь 3» и класс ракетносителя X_5 «тяжелый» и климатические условия X_6 «зима», ТО возможность появления дефектов $Y_Э$ «между Средней и Выше средней» (Продукционное правило 31 в матрице).

Пример построения логико-лингвистической модели на основе явных и неявных экспертных знаниях (2)

Задачи класса В. Формализация экспертных знаний

Опросная и расчетная матрицы для построения логико-лингвистической модели в задаче определения возможности возникновения дефектов металлооблицовки стартового комплекса

№ продукционных правил		Количество циклов	Класс РН	Толщина листа металлооблицовки	Качество металла листов металлооблицовки	Конструктивная схема покрытия металлооблицовки стартового сооружения	Климатические условия	Возможность возникновения дефекта	Фрагмент расчетной матрицы				Расчетные по полюсу	У _э -У _р	Остаточная дисперсия		
									Экспертные оценки		У ₁ ⁺ У ₂	У ₁ ⁺ У ₃				...	У ₄ ⁺ У ₅ ⁺ У ₆
									Вербальные У _э	Числовые У _э							
	х ₀	х ₁	х ₂	х ₃	х ₄	х ₅	х ₆										
1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	Н	0,1	1	1		-1	0,100	0,000	0	
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	НС-С	0,33	-1	-1		1	0,325	0,000	0	
3	1	-1	1	-1	-1	-1	1	С-ВС	0,48	-1	1		1	0,484	-0,009	4,19E-06	
...	
30	1	1	-1	1	1	1	-1	С-ВС	0,48	-1	1		-1	0,522	-0,047	0,000105	
31	1	-1	1	1	1	1	-1	НС-С	0,33	-1	-1		-1	0,344	-0,019	1,67E-05	
32	1	1	1	1	1	1	1	ВС-В	0,63	1	1		1	0,606	0,019	1,67E-05	
																0,001138	

Пример построения логико-лингвистической модели на основе явных и неявных экспертных знаниях (3)

Задачи классов В и Г

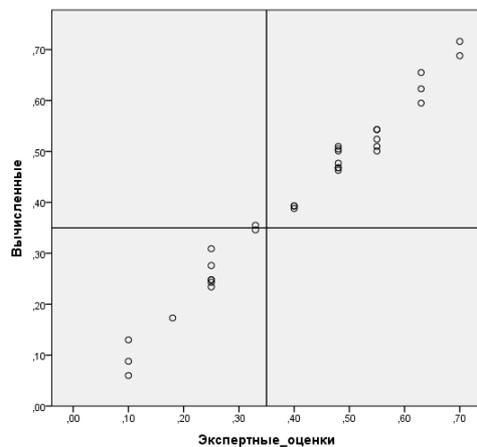
Проверка адекватности расчетов по полиному экспертным оценкам и реальным данным

ДАНО: полученное полиномиальное выражение со значимыми коэффициентами разложения. адекватность .

ТРЕБУЕТСЯ : оценить адекватность полученного полиномиального выражения.

1. Проводится оценка расчетных значений экспертным оценкам, например по корреляционному полю точек.
2. Проводится сравнение адекватности расчетных значений статистическим данными исследуемого СЛО или полученным данным специальных экспериментов.

Только после положительных оценок по обоим этапам полиномиальное выражение следует считать моделью изучаемого явления.



Корреляция между экспертными оценками и расчетными значениями по модели

Таблица. Оценивание возможности появления дефектов металлоблицовки после пусков РКН

	Количество циклов	Конструктивная схема	Толщина листа металлоблицок и	Марка стали	Класс РН	Климатические условия	Возможность возникновения дефекта	Привадежность к терму
Плесецк	5	Сварная	20	Ст.3	РН «Союз»	Зима	0,484	С-ВС
Плесецк	7	Сварная	20	Ст.3	РН «Союз-2» – РБ «Фрегат»	Зима	0,564	ВС - В
Плесецк	1	Болтовая	20	Ст.3	«Ангара А-1»	Зима	0,242	Н-НС
Плесецк	1	Болтовая	20	Ст.3	«Ангара А-5»	Зима	0,305	НС
Байконур	1	1	0	Ст.3	«Протон»	Лето	0,520	С-ВС

Научная новизна. 1. Априорно можно количественно оценить показатель возможности возникновения дефектов металлоблицовки.

2. Обоснован выбор конструктивной схемы металлоблицовки с повышенной устойчивостью к действию высокотемпературных и газодинамических нагрузок при пусках РКН различных классов.

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ СОСТОЯНИЯ СЛО НА ОСНОВЕ ЯВНЫХ И НЕЯВНЫХ ЭКСПЕРТНЫХ ЗНАНИЙ

♦ **ШАГ 1.** *Формулировка задачи, выбор и обоснование концептов факторного пространства, в котором принимается решение о состоянии СЛО. Требования: полнота, представительность, достаточность, системность описания, и др. О. (Задачи класса А. Извлечение экспертных знаний).*

♦ **ШАГ 2.** *Представление факторов в виде лингвистических переменных в соответствующих шкалах измерений. Построение нечетких продукционных правил имплицативного типа «Если..., то...» как формы представления ЭЗ. Требования: достаточность, использование ЛП. (Задачи класса Б. Представление экспертных знаний).*

♦ **ШАГ 3.** *Подготовка опросной матрицы для выбранного факторного пространства и заполнение ее экспертом. Строки матрицы – нечетких продукционных правил имплицативного типа «ситуация – оценка». Построение полиномиального выражения методами теории планирования экспериментов. (Задачи класса В4. Формализация экспертных знаний).*

♦ **ШАГ 4.** *Оценивание качества построенного полиномиального выражения. Адекватность вычислений по полиному со значимыми коэффициентами мнению эксперта и действительному состоянию СЛО переводит полином в логико-лингвистическую модель (ЛЛМ). Коэффициенты модели – отражение знаний и опыта эксперта (интенционал по Д. Поспелову). (Задачи класса В2, В3. Формализация экспертных знаний).*

♦ **ШАГ 5.** *Построение и профессиональный анализ логико-лингвистических моделей экспертом, извлечение качественно новой информации о конкретном СЛО. Использование моделей в качестве БЗ при создании ИАСУ ТП. (Задачи класса Г. Использование экспертных знаний).*

Выводы. 1. Разработаны новые подходы к представлению интеллектуальной информации нечеткими продукционными правилами на основе новой нечеткой арифметики нечетких чисел и лингвистических переменных.

2. Разработанные научно-методические основы обработки нечеткой экспертной информации и представления ее нечеткими продукционными правилами позволили привлечь классические методы теории планирования экспериментов для построения нового класса логико-лингвистических моделей состояния СЛО на основе явных и неявных экспертных знаний.

Анализ рисков возникновения опасных последствий при эксплуатации насосных агрегатов заправочного оборудования ракетно-космических комплексов

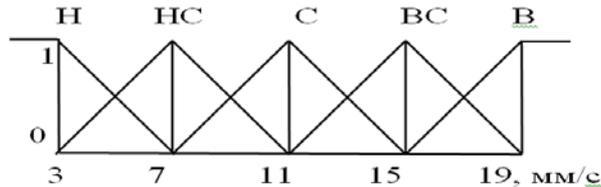
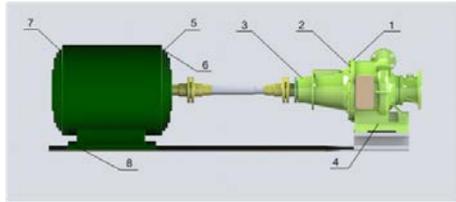


Рис.1 – Y как лингвистическая переменная

$$Y = 11,25 + 2,3125x_1 + 1,0625x_2 + 1,0x_3 + 1,0x_4 + 1,625x_5 + 0,8125x_6 + 0,5625x_7 - 0,4375x_1x_3 - 0,875x_1x_7 - 0,5x_2x_6 - 0,375x_2x_7 - 0,3125x_5x_6 - 0,375x_1x_5x_7 + 0,4375x_2x_4x_5$$

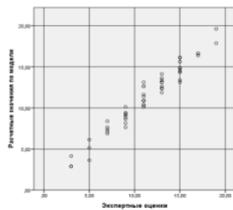


Рис.2 – Корреляция между экспертными и расчетными значениями

- ♦ ИСХОДНОЕ СОСТОЯНИЕ: величина виброскорости перед пуском РКН как индикатор работоспособности НА ЗО РКК.
- ♦ ТРЕБУЕТСЯ: построить модель величины измеренной виброскорости как обобщенного показателя действия всех дефектов.
- ♦ Факторное пространство:
 - ♦ X_1 – несоосность валов, (мкм);
 - ♦ X_2 – перекос колец, (градусы);
 - ♦ X_3 – показатель отсутствия ресурсной смазки (качественная переменная);
 - ♦ X_4 – влияние наведенной вибрации (качественная переменная);
 - ♦ X_5 – агрессивная среда в торцевом уплотнении (качественная переменная);
 - ♦ X_6 – время простоя между циклами, (мес.);
 - ♦ X_7 – температура опорных узлов, (°C);
 - ♦ Y – степень вибрации, (мм/с).

♦(1)

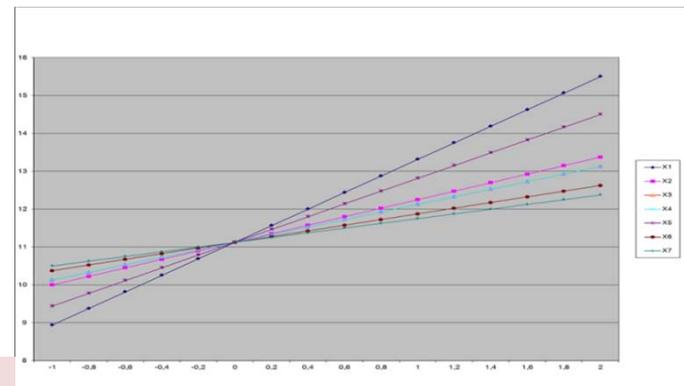
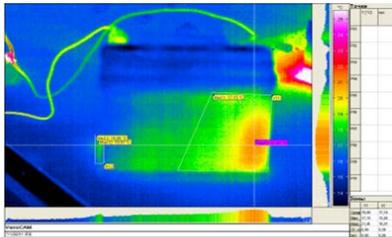


Рис.3 – Изменение переменных при остальных, закрепленных на постоянном уровне

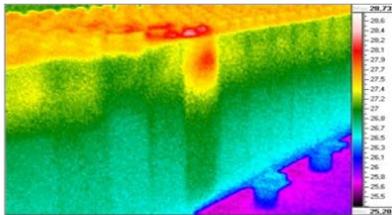
Достигнутый эффект. 1. Количественная оценка величин дефектов способствует ускорению производства наладочных работ НА ЗО РКК. 2. Применение методики дает возможность прогнозирования опасных последствий при развитии определенного вида дефекта. 3. Получен патент РФ № 2673629 от 28 ноября 2018 г.

♦ **Оценивание технического состояния химических источников тока (ХИТ) космодрома «Плесецк» (1)**

Исходное состояние. Принятая в настоящее время система оценивания технического состояния (ТС) ХИТ осуществляется на основе выборочного контроля, который предусматривает проведение испытаний с *разрушением* приборов. Это приводит к большим временным и экономическим затратам.



♦ отдельный аккумулятор



♦ батарея аккумуляторов

Типичные кадры
тепловизионной
съемки для
определения X_2 и X_5

Необходимо. Создать экспресс-методику *неразрушающего оценивания технического состояния ХИТ* в условиях существенной неопределенности на базе явных и неявных экспертных знаний.

Выбранное факторное пространство:

- ♦ x_1 - продолжительность срока службы, (количество циклов);
 - ♦ x_2 - фактическая величина электрической емкости ХИТ;
 - ♦ x_3 - величина сопротивления изоляции между электрическими цепями и корпусом батареи, электрическими цепями и цепями сигнализирующих устройств;
 - ♦ x_4 - величина разбаланса энергетических характеристик между аккумуляторами в батарее;
 - ♦ x_5 - состояние электрических цепей сигнализирующих датчиков (ДТЗ, ИКЗ);
 - ♦ x_6 - режим эксплуатации;
 - ♦ x_7 - наличие признаков разгерметизации (вздутие аккумуляторов, подтеки электролита), наличие признаков коррозии корпуса, нарушение лакокрасочного покрытия.
- ♦ Выходная переменная: Y – агрегированный (обобщенный) показатель ТС (ОПТС) ХИТ

Задачи класса Г. Использование экспертных знаний ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ОЦЕНИВАНИЕ СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Оценивание технического состояния химических источников тока (ХИТ) космодрома «Плесецк» (2)

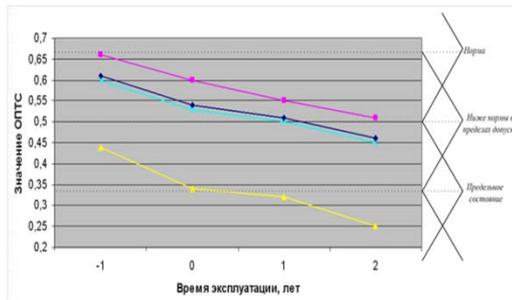
$$Y = 0,416 + 0,0787x_1 + 0,1313x_2 + 0,0313x_4 + 0,0102x_6 + 0,0948x_7 + 0,0154x_1x_4 - 0,0106x_1x_5 - 0,0257x_1x_6 + 0,0105x_2x_5 - 0,0106x_3x_5 + 0,0107x_4x_6 + 0,0105x_4x_7 - 0,0107x_1x_2x_7 + 0,0104x_1x_2x_6 - 0,011x_1x_2x_7 - 0,0106x_1x_3x_4 + 0,0154x_2x_4x_7 + 0,0209x_3x_4x_5 + 0,0101x_3x_5x_6 - 0,0107x_3x_5x_7.$$

$$grad(Y) = \sqrt{\sum (dY/dx_i)^2}$$

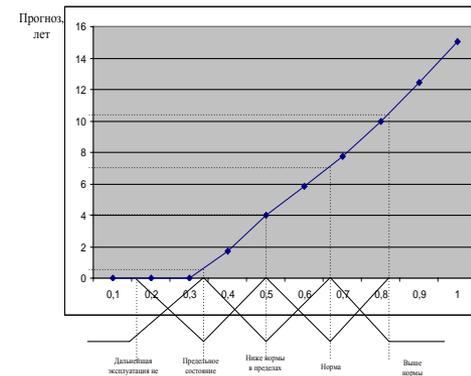
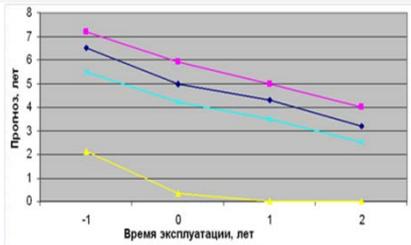
$$\tau_i = (Y_i - Y_{пред}) / grad(Y_i)$$

$$t_{прогн} = t_{гар} \tau_i^{факт.} / \tau^{гар.}$$

- $t_{гар.}$ – гарантийный срок эксплуатации изделия;
- $\tau_i^{факт.}$ – фактическое значение коэффициента относительного времени оставшегося ресурса на момент проведения обследования;
- $\tau^{гар.}$ – значение коэффициента относительного времени оставшегося ресурса по гарантийным данным.



•Изменение агрегированного состояния ХИТ



•Изменение прогнозируемого остаточного ресурса (годы) от величины фактического значения СЛО

Результат. 1. Разработана инженерная экспресс-методика *неразрушающего контроля* технического состояния ХИТ в условиях существенной неопределенности на базе экспертных знаний.

2. Количественные оценки состояния ХИТ в многомерном пространстве позволяют проводить мониторинг изделий для выработки гибкой стратегии эксплуатации объектов исследования. Результаты мониторинга позволят комиссии повысить оперативность и объективность принятия решения по продлению срока службы

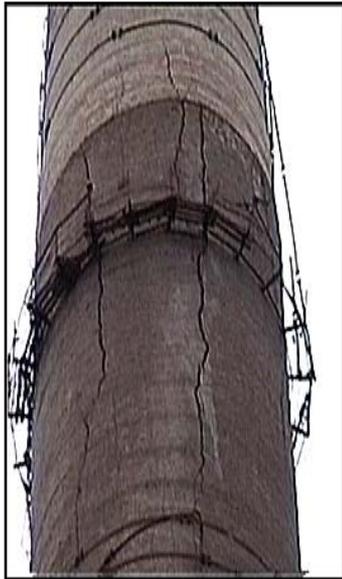
3. С помощью построенной модели вырабатывается принципиально новая обобщенная информация для оперативного принятия комиссией более обоснованных решений о возможности продления сроков эксплуатации изделий.

4. Результаты исследования легли в основу алгоритмического обеспечения интеллектуальной информационно-диагностической системы количественного определения прогнозирования остаточного ресурса ХИТ.

5. Получен патент РФ № 2467436. Способ неразрушающего контроля технического состояния химических источников тока

ОЦЕНИВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЕННОГО СЛОЖНОГО ОБЪЕКТА (1)

Исходное состояние. Введение не предусмотренного первоначальным проектом водяного пылеулавливания инициировало разрушение дымовой трубы металлургического предприятия.



Необходимо. Для принятия эффективных инженерных и управленческих решений при условии сохранения максимально возможной безаварийной работоспособности создать прогнозную модель состояния дымовой трубы металлургического завода (Норильск).

Выходная переменная:

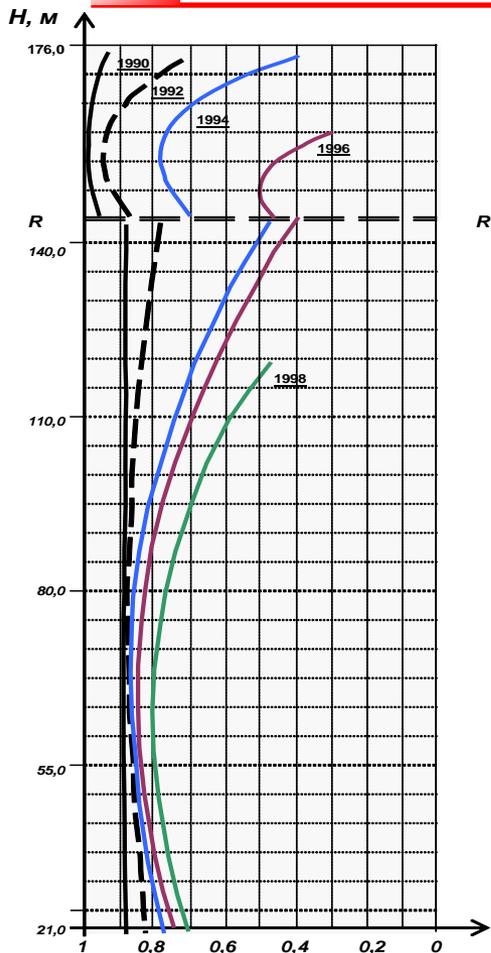
Y – агрегированный (обобщенный) показатель состояния элемента объекта, [0,1].

♦ Входные переменные:

- ♦ X1 - уровень деформации стяжных колец (качественная переменная);
- ♦ X2 - ширина раскрытия трещин (мм);
- ♦ X3 - градиент раскрытия трещин (мм/год);
- ♦ X4 - градиент изменения общего количества дефектов (качественная переменная);
- ♦ X5 - материал наружной стенки ствола (качественная переменная).

♦ **Наблюдаемые дефекты:**
вертикальные трещины;
деформация стяжных колец,
разрушение оголовка

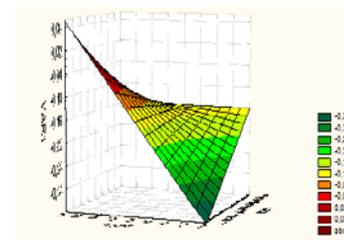
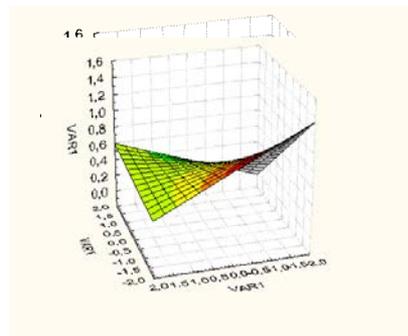
ОЦЕНИВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЕННОГО СЛОЖНОГО ОБЪЕКТА (2)



♦Рис.1 – Тренд состояния СЛО.

♦ Числа у кривых – года

$$Y = 0,469 - 0,063x_1 - 0,125x_2 - 0,156x_3 - 0,063x_4 + 0,063x_5 - 0,031x_2x_4 + 0,063x_3x_4 - 0,031x_2x_3x_4 \quad (1)$$



♦Рис.2 - Визуализация функции отклика и ее частной производной

♦ Таблица 1. Прогнозные по модели и фактические значения технической устойчивости объекта

Год	Состояние объекта	Расчет ОПТС	Прогноз на следующий год	Примечания
1991	Стабильное	0,823	Нестабильное	
1992	Нестабильное	0,706	Крайне нестабильное	
1993	Крайне нестабильное	0,512	Аварийное	Отклонение верхней части ствола трубы от вертикальной оси в двух направлениях. Смещение оголовка
1994	Аварийное	0,321	Естественное разрушение	Прогрессирующее развитие горизонтальных трещин. Разрушение кладки оголовка.

Достигнутый эффект. 1. Продление безаварийной ситуации эксплуатации дымовой трубы в течение 12 лет.

2. Адекватное оценивание состояния СЛО – реальный и эффективный способ управления безопасностью рискованным объектом.

Информационная модель нечеткого логического регулятора (НЛР) с интеллектуализированной базой знаний

Исходное состояние: операторное управление по данным АСУ процессом обжига в печи кипящего слоя (Никелевый завод, Норильск)

Требуется: создать логико-лингвистическую модель как БЗ НЛР

Концепты факторного пространства:

- X_1 – скорость подачи концентрата, т/час;
- X_2 – скорость подачи пыли, т/час;
- X_3 – температура в реакционной зоне, °С;
- X_4 – grad T, °С/мин;
- X_5 – давление в рабочей камере, мм в ст;
- X_6 – время отслеживания процесса, мин;
- Y_1 – уставка скорости подачи концентрата, т/час;
- Y_2 – уставка скорости подачи пыли, т/час.

$$\begin{aligned}
 Y_1 = & 12,56 + 0,77x_1 + 1,31x_2 - 0,73x_1x_2 - 1,43x_6 - 1,15x_1x_6 - 2,1x_4 + \\
 & + 1,83x_1x_4 - 1,24x_2x_4 - 1,19x_1x_2x_4 - 0,53x_2x_4x_6 - 0,95x_3 + 1,12x_1x_3 - \\
 & - 1,72x_2x_3 - 0,72x_1x_2x_3 - 1,63x_2x_3x_6 - 1,22x_3x_4 - 1,23x_3x_4x_6 + + 0,56x_5x_6 - \\
 & - 0,55x_1x_5x_6 - 0,9x_3x_5; \quad (1) \\
 Y_2 = & 4,8 + 1,4x_2 - 0,55x_6 - 0,52x_1x_2x_4 - 0,58x_1x_2x_3 - 0,55x_2x_3x_6; \quad (2)
 \end{aligned}$$

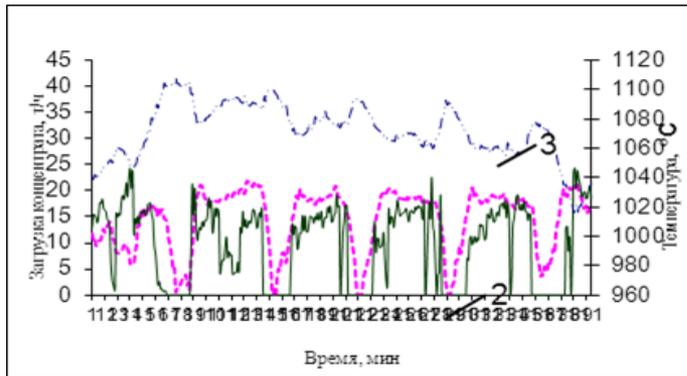


Рис.2. - Изменение загрузки концентрата в печь КС по времени: 1 – фактическая; 2 – расчетная по (1); 3 – изменение температуры в реакционной зоне

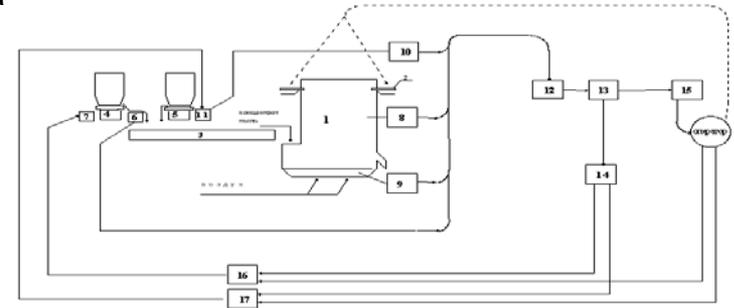


Рис.1 - Схема автоматизированного управления процессом обжига никелевого концентрата в печи кипящего слоя (КС)

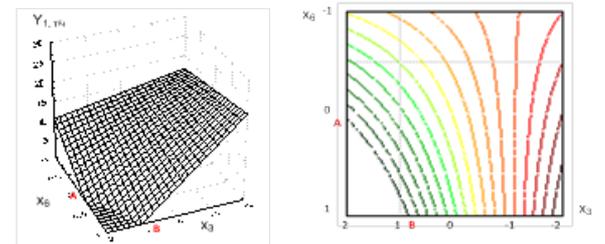


Рис.3 - Объемный и плоскостной портреты функции отклика $Y_1 = 10,46 - 4,39x_3 - 3,1x_6 - 2,85x_3x_6$

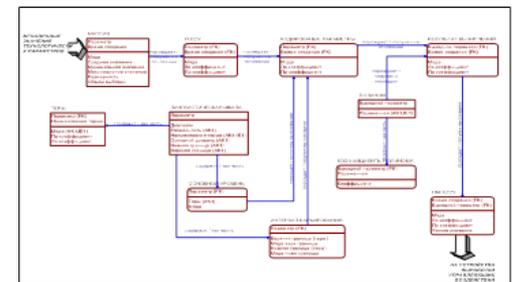


Рис.4 - Объектно-ориентированная модель механизма обработки числовой информации внутри НЛР

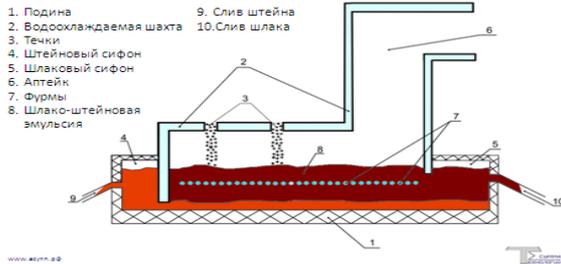
Результат:

- 1. Повышение производительности агрегата на 25-30 %.
- 2. Повышение безопасности ведения процесса за счет автоматического отслеживания приближения к предаварийной области.
- 3. Получен патент РФ № 2204616

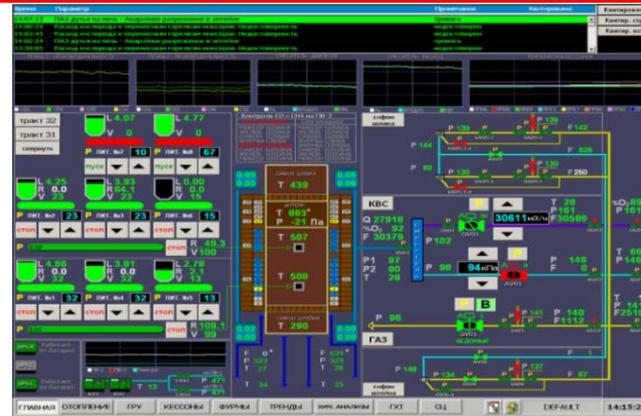
Синтез интеллектуальной автоматизированной системы управления (ИАСУ) сложным технологическим процессом

- **Исходное состояние:** ручное управление по данным АСУ ТП (Медный завод, «ГМК «Норильский никель»).
- **Требуется:** создать интеллектуализированную АСУ управления плавильным процессом в условиях существенной неопределенности на основе явных и неявных экспертных знаний.

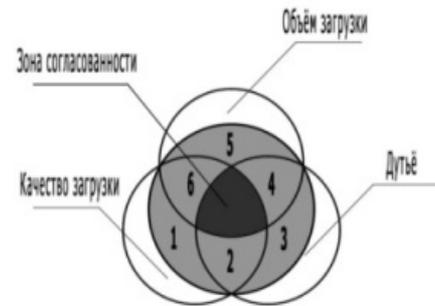
Печь Ванюкова



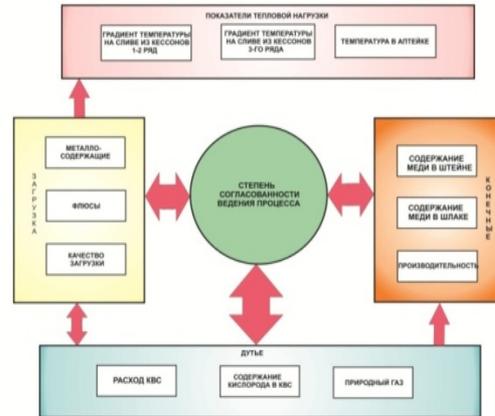
•Рис.1. Агрегат для реализации процесса Ванюкова (ПВ)



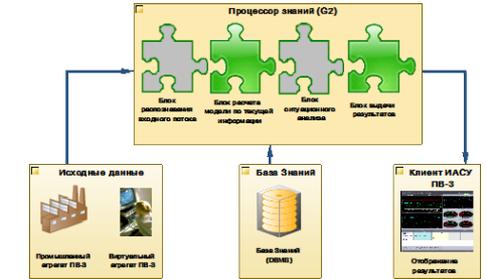
•Рис. 2. Интерфейс на АРМ оператора АСУ ПВ



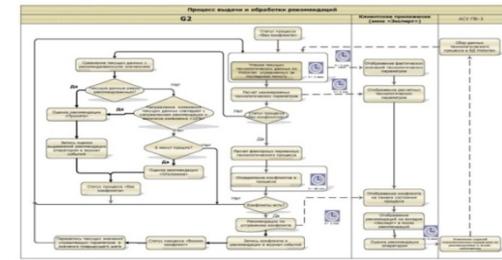
•Рис.3. Методология управления ПВ на основе «принципа разрешения конфликтов»



•Рис.4. Схема модели управления ПВ по степени согласованности процесса в целом



•Рис.5 –Общий вид архитектуры ИАСУ и фрагмент алгоритма обработки и выдачи рекомендаций для принятия решения оператором-технологом



Синтез интеллектуальной автоматизированной системы управления сложным технологическим процессом (продолжение)

Y_1 – степени согласованности, б/р

$$Y_1 = 0,4383 - 0,0352x_1 - 0,1008x_2 - 0,0914x_3 - 0,0352x_4 - 0,0164x_5 + 0,0164x_1x_2 + 0,0258x_1x_3 + 0,0539x_2x_3 + 0,0164x_2x_4 + 0,0164x_2x_5 + 0,0258x_3x_4 + 0,0164x_3x_5 - 0,0164x_2x_3x_5, \quad (1)$$

где в кодированном виде представлены:

$$x_1 = (X_1 - 5)/5, \quad \text{где } X_1 - \text{отклонение загрузки флюсов от заданной нормы, т/ч;}$$

$$x_2 = (X_2 - 6)/6, \quad \text{где } X_2 - \text{нормированное отклонение удельного расхода кислорода на тонну МС, б/р;}$$

$$x_3 = (X_3 - 5)/5, \quad \text{где } X_3 - \text{отклонение расчетного содержания меди в штейне от нормируемого, \%};$$

$$x_4 = (X_4 - 0,6)/0,2, \quad \text{где } X_4 - \text{расчетное содержание меди в шлаке, \%};$$

$$x_5 = (X_5 - 1340)/40, \quad \text{где } X_5 - \text{температура расплава, } ^\circ\text{C};$$

$$X_5 (= Y_8) = 1322,47 + 2,84x_{10} + 13,59x_{13} - 5,91x_{19} + 7,34x_7$$

$$+ 5,09x_{10}x_{13} + 5,09x_{10}x_7 - 1,91x_{19}x_7 - 1,97x_{19}x_{20}$$

$$+ 1,97x_{10}x_{13}x_{19} - 1,91x_{10}x_{13}x_7, \quad (2)$$

где в кодированном виде представлены:

$$x_{10} = (X_{10} - 60)/40, \quad \text{где } X_{10} - \text{загрузка МС, т/ч;}$$

$$x_{13} = (X_{13} - 200)/50, \quad \text{где } X_{13} - \text{удельный расход кислорода, м3/т;}$$

$$x_{19} = (X_{19} - 0,15)/0,15, \quad \text{где } X_{19} - \text{доля инертных, б/р;}$$

$$x_7 = (X_7 - 2400)/1400, \quad \text{где } X_7 - \text{расход природного газа, м3/ч;}$$

$$x_{20} = (X_{20} - 10)/10, \quad \text{где } X_{20} - \text{влажность шихты, \%};$$

$$Y_8 - \text{температура расплава в реакционной зоне, } ^\circ\text{C}.$$

Результат:

1. Система реализовала задачу ведения процесса в «узком» коридоре значений основных технологических параметров согласованности и выполнении всех плановых заданий как по качеству конечных продуктов, так и по производительности.

2. Промышленное внедрение ИАСУ ПВ-3 на МЗ 3Ф «ГМК «Норильский никель» (Норильск, 2013).

3. Фактически реализован наиболее общий подход к решению многоуровневого распознавания состояния сложных технологических процессов, объектов или явлений в любой отрасли.

3. Получен патент РФ № 2 571 968.



Интерфейс ИАСУ ПВ на АРМ оператора: 1-изменение удельного расхода кислорода на тонну шихты; 2- изменение содержания меди в штейне; 3- изменение содержания диоксида кремния в шлаке; 4 – индикатор содержания меди в шлаке; 5- % флюсов в загрузке; 6- индикатор качества загрузки; 7- индикатор температуры расплава; 8- почасовая производительность по материалам загрузки; 9- отражение наличия конфликта и его идентификация; 10- корректировка удельного расхода кислорода; 11- заливка конвертерного шлака

♦ ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МНОГОУРОВНЕВОЙ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОХРАННОСТИ БИОПОТЕНЦИАЛА ТРАВ ПРИ ИХ КОНСЕРВАЦИИ



♦ Метауровнение. Уровень 1.

$$Y = 11,63 + 3,56x_1 + 1,31x_2 + 2,81x_3 + 2,06x_4 + 1,69x_5 + 0,38x_1x_2 - 0,75x_1x_4 - 0,38x_2x_3 - 0,38x_2x_4 + 0,75x_3x_4 - 0,38x_3x_5 + 0,38x_4x_5 + 0,94x_1x_3x_4,$$

♦ Уровень 2.

$$X_3 = 8,859 + 0,703x_{31} + 0,109 x_{32} + 0,172 x_{33} + 0,359 x_{34} + 0,140 x_{35} + 0,359 x_{36} - 0,109 x_{34} x_{35} - 0,109 x_{31} x_{34} x_{36} - 0,109 x_{32} x_{33} x_{35},$$

♦ Обобщенный показатель объема заготовленной зеленой массы (Y, т/га), с одной стороны, рассматривается как возможное достижение при осуществлении управления технологическим процессом, а с другой, – используется для прогнозирования в зависимости от получаемых значений переменных в различных хозяйствах.

♦ Расчетные и фактические значения выхода зеленой массы кормов в различных хозяйствах Ленинградской области

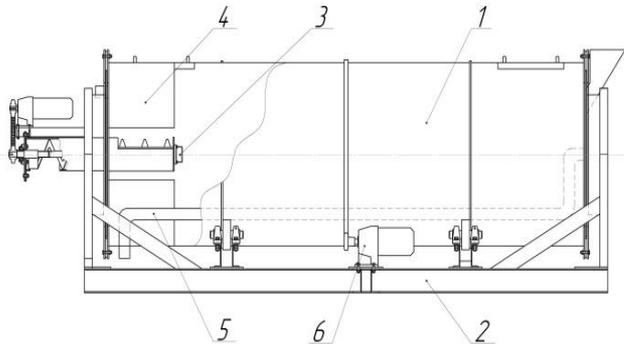
♦ **Результат: 1.** Построенная многоуровневая иерархическая модель для обоснованного оценивания уровня работы хозяйств, областей и регионов.

♦ **2.** Заложены основы теории потенциалов современных агропромышленных предприятий.

Хозяйство	Выход зеленой массы с 1га, т		
	Y _{Рас}	Y _{Фак}	Δ, %
ФГБУ «Каложицы», Волосовский район	16,7	16,1	4,0
ОАО «Рассвет», Лужский район	12,9	13,0	-0,3
ЗАО «Андреевское», Тихвинский район	9,74	10,1	-4,6

♦ ЛОГИКО-ЛИНГВИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КАК БАЗА ЗНАНИЙ ДЛЯ АСУ ПРОЦЕССА РЕЦИКЛИНГА ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ ЖИВОТНОВОДСТВА

♦ Работа выполняется в рамках Международной программы: «Существенное снижение биогенных нагрузок на регион Балтийского моря».



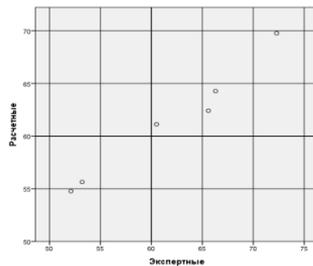
♦ Рис. 1 Барабанный биоферментатор

♦ 1 – барабан, 2 – рама, 3 – выгрузное устройство, 4 – лопатки, 5 – аэрационная труба, 6 – привод

♦ *Факторное пространство:*

- ♦ X_1 – влажность исходного материала, %;
- ♦ X_2 – пористость исходного материала, %;
- ♦ X_3 – интервал между вращением барабана, ч;
- ♦ X_4 – температура подаваемого воздуха, °С;
- ♦ X_5 – время аэрации, мин/ч;
- ♦ X_6 – скорость аэрации, м/с;
- ♦ Y – температура в биоферментаторе, °С.

♦ Рис.1. Корреляция экспертных и рассчитанных значений температуры в биоферментаторе

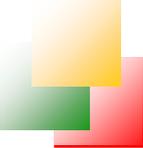


$$\begin{aligned}
 \diamond Y_1 = & 68,16 + 4,34x_2 - 1,52x_3 + 1,76x_4 + 5,04x_5 + 2,23x_6 - \\
 & - 0,82x_2x_4 + 0,82x_3x_5 + 0,82x_4x_6 - 2,46x_5x_6 + 1,29x_1x_2x_3 - \\
 & - 0,59x_1x_2x_5 - 0,82x_1x_3x_4 + 0,59x_1x_3x_6
 \end{aligned}$$

♦ **Результат: 1. Повышение производительности агрегата за счет выбора рационального ведения процесса.**

♦ **2. Снижение экологической нагрузки на окружающую сред, в том числе поступления азотистых соединений в акваторию Балтийского моря.**

♦ **3. Подана заявка на изобретение.**

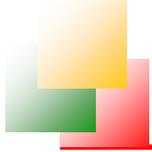


Реализация полученных в работе результатов

- 1) Центр испытаний и контроля эксплуатации филиала ФГУП «ЦЭНКИ»-КЦ «Южный»
- 2) В ФГУП «СКБ Титан»
- 3) В войсковой части 85487
- 4) «ГМК «Норильский никель» ИАСУ ПВ-3 («Сумма технологий»)
- 5) Норильск, МЧС + МАНЭБ
- 6) Конструкторское бюро «СКБ ОРИОН»
- 7) Учебный процесс: Норильский ИИ, ГУАП

Основные результаты исследований

- ♦ 1. Разработана концепция и новый класс логико-лингвистических моделей представления явных и неявных экспертных знаний о состоянии СЛО.
- ♦ 2. Разработан метод формализованного описания интуитивно-словесных и неявно-заданных экспертных знаний о состоянии конкретных СЛО с использованием нечетко-возможностного подхода и теории планирования экспериментов.
- ♦ 3. Разработаны новые способы задания нечетких чисел (LR)-типа и дополнительных арифметических операций над массивами нечетких чисел (LR)-типа для сохранения первоначальной нечеткости.
- ♦ 4. Разработан способ задания меры в нечетких многомерных пространствах нечетких чисел (LR)-типа для оценивания различия между состояниями СЛО, функционирующего в условиях неопределенности.
- ♦ 5. Созданы методика и алгоритмическое обеспечение задач оценивания состояния СЛО нечеткими функциями в многомерном пространстве лингвистических переменных, реализующие концепцию построения логико-лингвистических моделей на основе агрегированных явных и неявных ЭЗ.
- ♦ 6. Разработаны критерии оценивания степени адекватности и представительности расчетов характеристик агрегированного состояния СЛО по логико-лингвистическим моделям с учетом нечетких данных об особенностях функционирования СЛО и заданных условий эксплуатации.
- ♦ 7. Получены результаты применения теоретических исследований при решении практических задач оценивания состояния реальных СЛО в различных областях науки и техники.



Благодарю за внимание!