

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации
Российской академии наук (СПИИРАН)

На правах рукописи



Спесивцев Александр Васильевич

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

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление
и обработка информации (технические системы)

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант:
Заслуженный деятель науки РФ,
Лауреат премии правительства РФ
в области науки и техники,
доктор технических наук профессор
Соколов Борис Владимирович

Санкт-Петербург – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Глава 1. Анализ и формализация проблемы оценивания состояния сложных объектов на основе явных и неявных экспертных знаний	28
1.1 Проблема сложности в задачах оценивания состояния объектов произвольной природы	28
1.2 Анализ существующих подходов к оцениванию состояния сложного объекта	33
1.3 Нечетко-возможностный подход к оцениванию состояния СЛО.....	42
1.4 Декомпозиционно-агрегированный подход к решению проблемы построения моделей для оценивания состояния СЛО	48
1.5 Анализ и обоснование вариантов формализации экспертных знаний при оценивании состояния СЛО	54
Выводы по 1 главе	83
Глава 2. Математические модели выполнения унифицированных арифметических операций над нечеткими числами, используемыми при формализации экспертных знаний.....	86
2.1 Разработка унифицированной формы записи расширенных арифметических операций, не чувствительных к знаку нечетких чисел	88
2.2 Обобщение дополнительных арифметических операций над нечеткими числами (LR)-типа знакопеременного ряда.....	98
2.3 Решение нечетких уравнений в пространстве дополнительных арифметических операций.....	102
Выводы по 2 главе	106
Глава 3. Метод формализованного описания экспертных знаний в пространстве лингвистических переменных	108
3.1 Применение (LR)-аппроксимации для построения алгоритмов нечеткого вывода.....	109
3.2 Определение нечеткой метрики на множестве нечетких чисел (LR)-типа..	112
3.3 Исследование свойств нечетких метрических пространств на множестве нечетких подмножеств применительно к построению нечетких моделей	118
3.4 Синтез процедур представления нечеткой информации при формализации экспертных знаний полиномиальными моделями.....	123
3.5 Метод извлечения и структуризации экспертной информации в виде математических моделей	133
Выводы по главе 3	146
Глава 4. Методическое обеспечение решения задач оценивания и прогнозирования состояния сложных объектов в пространствах лингвистических переменных.....	148
4.1 Методика классификации состояний СЛО в пространствах нечетких переменных	148
4.2 Формализации экспертной информации полиномиальными моделями	155

4.3	Выбор и обоснование критериев адекватности полиномиальных моделей оценивания и прогнозирования состояния СЛО	167
4.4	Оценивание состояния пространственно-распределенного объекта в целом.....	173
4.5	Критерии оценивания степени адекватности и представительности построенных математических моделей в условиях неопределенности	175
	Выводы по 4 главе	179
Глава 5. Экспериментальная апробация теоретических исследований при построении моделей однопараметрического оценивания состояния сложных объектов в статических условиях		
	5.1 Оценивание степени развития дефектов при эксплуатации насосных агрегатов заправочного оборудования ракетно-космических комплексов	185
	5.2 Прогнозирование повреждаемости элементов конструкции и оборудования стартовых комплексов в условиях интенсивного теплового нагружения	198
	5.3 Методики оценивания технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса химических источников тока на базе математической модели.....	207
	5.4 Оценивание состояния пространственно-распределенного объекта.....	220
	Выводы по главе 5	239
Глава 6. Экспериментальная апробация теоретических исследований при построении моделей многопараметрического оценивания состояния сложных объектов в динамических условиях		
	6.1 Информационная модель нечеткого логического регулятора управления производственным процессом	241
	6.2 Синтез интеллектуальных автоматизированных систем управления сложными технологическими процессами	251
	Выводы по главе 6	275
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	278
	Список литературы.....	281
	Приложения.....	317
	Приложение 1. Доказательства тождественности новых форм представления нечетких чисел (LR)-типа и арифметических операций над ними	317
	Приложение 2. Структурно-топологическое описание сложного производственного процесса.....	323
	Приложение 3. Решение задач акмеологии и психологии личности.....	331
	Приложение 4. Эффект «емкости информации» при оценивании состояния СЛО	346
	Приложение 5. О новом классе задач в теории управления динамическими системами	350
	Приложение 6. Документы о внедрении и использовании результатов исследований.....	352

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В условиях появления принципиально новых классов сложных объектов (СЛО) проблема оценивания их состояния выступает в качестве стратегического направления автоматизации и интеллектуализации соответствующих процессов в различных областях науки и техники [1,3,5,11,15,35, 94,140,178,181,209,224,296-303,316].

Заметим, что в данном контексте понятие «сложные объекты» включает такие понятия как «сложные явления», «сложные технологические процессы», «сложные системы», в том числе и самого человека, рассматриваемого как элемент СЛО, отвечающего за генерацию, хранение и использование знаний.

Особенностью современных СЛО является то, что они функционируют в условиях, задаваемых, как правило, конечным множеством количественных и неколичественных (вербальных) переменных и соответствующих ограничений. При этом, многие задачи оценивания их состояния формулируются и описываются как вербально на профессиональном языке данной отрасли знаний, так и формально с использованием различных классов моделей.

Примерами СЛО могут служить практически все существующие объекты, входящие в состав транспортно-логистических, космических, экономических, производственных, сельскохозяйственных и др. систем [1,4,10,24,29,30,38,45,49-52,60,72-75,134,159, 170-171].

Проведенный анализ научно-технической литературы показал, что широкое применение на практике при оценивании состояний СЛО нашли методы и модели, базирующиеся на использовании экспертных знаний. В настоящем исследовании под экспертными знаниями понимаются явные и неявные знания субъекта, накопленные в процессе практической деятельности в конкретной предметной области и позволяющие ему выступать в качестве «интеллектуальной измерительно-диагностической системы» на различных этапах жизненного цикла СЛО [239].

Неявные экспертные знания, присутствующие в заглавии диссертации, наряду с явными играют ключевую роль в процессах принятия своевременных и

обоснованных решений о состоянии СЛО. **Неявные знания** (англ. tacit knowledge) – это знания субъекта, которые не могут быть формализованы в виде слов или алгоритмов и переданы другим субъектам [138,157,158,271]. В состав неявных знаний, согласно исследованиям ученых-психологов, включают в том числе и такие свойства человеческого мышления, как ноу-хау, секреты мастерства, умения, навыки и опыт. На практике эффективность использования неявных экспертных знаний наиболее ярко проявляется в ситуациях, когда лицу, принимающему решения (ЛПР), необходимо обоснованно и своевременно формировать и выдавать на СЛО соответствующие управляющие воздействия при недостаточности, неполноте и противоречивости данных и информации о текущей обстановке, а также в условиях существенных временных ограничений.

Однако в отечественной и зарубежной научно-технической литературе, несмотря на многочисленные варианты использования экспертных знаний для решения конкретных задач [21,22,81,102,96,121-125,128,142,177,179-182], вопросы описания неявных знаний эксперта с точки зрения практического использования его именно как «интеллектуальной измерительно-диагностической системы» практически не рассматривались. Тем не менее, экспертные знания играют решающую роль в оценивании состояний СЛО, в том числе и технических состояний, особенно в условиях неопределенности [3-5,12-14,23,27,28,35-40,53,58,68,69,96-98,118,127,129,132].

Согласно ГОСТ [65] техническое состояние СЛО – состояние, которое характеризуется в определенный момент времени, при определенных условиях внешней среды, значениями параметров, установленных технической документацией на объект.

В свою очередь, в данном исследовании под *состоянием СЛО* в конкретный момент времени будем понимать множество его параметров (характеристик), определяемых контекстом решаемой задачи, либо поставленной цели и позволяющих ЛПР своевременно и обоснованно принимать решение о работоспособности (неработоспособности) СЛО и возможности его дальнейшего

использования по назначению [53, 57, 66, 80, 88, 89, 106, 110, 119, 120, 129-131, 141-144, 167-169, 183-186].

При этом СЛО обладает целым рядом особенностей, существенно отличающих его от объектов традиционно исследуемых в рамках существующих теорий управления. Так, например, влияние на СЛО множества различных по своей физической природе факторов, взаимодействия с окружающей средой, увеличение числа входящих в его состав элементов, параметров, а также стремительный рост числа взаимосвязей между ними, не полностью устранимая неопределенность процедур оценивания их состояния, ограниченность сведений по взаимовлияниям между факторами приводят к необходимости использования знаний и опыта экспертов [27, 31, 36, 40, 44, 61, 63, 82, 103, 120, 132, 133, 143, 156, 175, 176, 169, 192, 203, 220-222, 233, 239]. Поэтому остро встают проблемы формализованного описания состояния конкретного СЛО, а также разнообразных его элементов, взаимосвязанных материальных и организационных структур, предназначенных для обеспечения устойчивой деятельности СЛО.

В качестве дальнейшей детализации перечисленных проблем можно привести наиболее характерные задачи, решение которых осуществляется с привлечением экспертных знаний [20, 56-58, 70, 71, 79, 90, 91, 101, 108, 111-113]. К указанным задачам могут быть отнесены:

- прогнозирование развития техники в определенной области человеческой деятельности;
- определение альтернативных вариантов принятия решений при оперативном управлении системой;
- повышение уровня целевых и информационно-технических возможностей с обеспечением «благоприятных» процессов; обоснование критериев оценки эффективности применения СЛО;
- определение целей и задач управления с упорядочением их по степени важности и согласованности решений (последовательности реализации);
- распределение ресурсов (средств) для достижения поставленных целей и др.

Таким образом, для широкого круга слабоструктурируемых (трудноформализуемых) проблем в политической, экономической, военной, научно-технической, медицинской и других областях человеческой деятельности экспертные знания и соответствующие процедуры их обработки являются весьма востребованными.

Результаты многочисленных исследований показали, что качество оценивания состояния СЛО непосредственно влияет на эффективность, оперативность и обоснованность принятия решений, связанных с функционированием СЛО. При оценивании указанных состояний СЛО остро встают вопросы интерпретации неколичественных (неизмеряемых, вербальных) компонент информации количественными категориями. В таких условиях оценивание фактического состояния СЛО представляется важнейшей задачей, требующей научно обоснованного подхода к выбору методов интеграции (обобщения) количественной и неколичественной информации о текущем состоянии объекта в условиях неопределенности.

Исследования показывают, что процесс подготовки исходных данных о состоянии СЛО должен быть в достаточной степени формализован, чтобы на основе собранной информации представлялась возможность получения количественных оценок состояния СЛО, например, с использованием системы продукционных правил или логико-лингвистических моделей [97], дополненными критериями отнесения его состояния к определенному классу. При этом необходимо учитывать, что предметная область, к которой относится СЛО, обладает, как правило, рядом существенных особенностей, о которых шла речь выше. Следовательно, в реальных ситуациях необходимо вооружить эксперта таким *методологическим и методическим аппаратом*, которые позволяли бы ему своевременно и обоснованно получать оценку о фактическом состоянии СЛО в конкретный момент времени.

Существенное повышение сложности СЛО вызывает, как правило, лавинообразное увеличение количества контролируемых и не контролируемых факторов. В подобных случаях без применения специальных методов

агрегирования информации такое положение дел приводит к ошибкам управления СЛО с потерей оперативности и, в конечном счете, эффективности функционирования самой системы.

Наиболее известные методы интеграции экспертных знаний базируются на использовании матриц анкетирования, которые статистически обрабатываются с целью получения требуемой информации для выявления исследуемых тенденций. Затем производится их статистическая обработка с целью получения требуемой информации для выявления некоторых тенденций. Например, после обработки матриц попарных сравнений [197] получают оценки *предпочтений*. Полученную таким образом информацию возможно свернуть только в конце исследования.

Агрегирование (обобщение) разнородной информации возможно также на основе регуляризирующего байесовского подхода (РБП) с использованием системы «Инфоаналитик», например, для решения задач контроля и снижения риска при оценивании ситуации в условиях неопределенности [132,156,188]. Однако и РБП в результате может дать только вероятностную оценку *предпочтения* одной из альтернативных гипотез, так что использование данного подхода в качестве процедуры создания модели для целей управления СЛО не представляется возможным в принципе.

Одним из наиболее распространенных приемов эвристического агрегирования данных является приведение их к безразмерному виду и суммированию с некоторыми, как правило, субъективно определяемыми весовыми коэффициентами (аддитивная свертка), или перемножению с некоторыми, также субъективно определяемыми, показателями степеней (мультипликативная свертка), в которые они возводятся. В этом случае вид свертки и значения коэффициентов определяются на основе инструкций или опыта, но в большинстве случаев – с учетом экспертных оценок. Получается, что при эвристическом агрегировании эксперту в завуалированном виде «навязывают» линеаризацию причинно-следственных связей между зависимыми и независимыми переменными при аддитивной свертке или, что еще труднее для эксперта, между их логарифмами – при мультипликативной свертке. И это притом, что эксперту необходимо

учитывать особенности функционирования объектов исследования: неизбежный тренд параметров состояния СлО; запасы его остаточного технического ресурса; неравномерность морального и материального старения составных функциональных частей СлО; существенную неопределенность информации на всем жизненном цикле объектов при их эксплуатации и многие другие факторы. Естественно, такая «вынужденная» линеаризация приводит к некорректной оценке состояний объектов и способна инициировать нештатные аварийные ситуации и, соответственно, огромные экономические потери по их ликвидации [8,9,56].

Необходимость учета всех перечисленных особенностей в условиях отсутствия научно обоснованного методического обеспечения приводит к значительным затратам времени на получение необходимых данных и, как следствие, к потере оперативности и отсутствию требуемой степени обоснованности принятия решений экспертом или ЛПР при оценивании состояния СлО. При этом «волевое» игнорирование объективно существующей нечеткой (неколичественной) информации о состоянии СлО, являющейся во многих случаях единственно доступной, приводит на практике к существенному огрублению данных и способствуют, как правило, получению четкого, но неверного результата [41-44].

Степень разработанности темы. Говоря в целом об исследованиях по методам оценивания состояния СлО в условиях неопределенности, необходимо отметить богатый накопленный опыт, полученный к настоящему времени как отечественными, так и зарубежными учеными. Так, например, проведены многочисленные исследования по формализации и анализу недостоверной, неполной, неточной и противоречивой информации применительно к задачам моделирования, управления и оценивания состояния СлО. К наиболее значимым научным и практическим результатам по рассматриваемым в диссертации вопросам следует отнести разработанные к настоящему времени способы формализации факторов неопределенности, применение нечетких отношений, нечеткие модели оптимизации и принятия решений, нечеткие модели многокритериальных задач, нечеткие лингвистические модели и др. В получении

этих научных и практических результатов выдающуюся роль сыграли исследования, выполненные в работах:

Аверкина А.И. [3-5], Алексеева А.В. [10,11,19,43], Беллмана Р.Е. [35], Блишуна А.Ф. [3], Борисова А.Н.[42-44], Геловани В.А. [61], Дюбуа Д. [81,281-284], Еклунда П. [285], Заде Л.А. [35,85,86,325-328], Калинина В.Н. [94,95], Коско В. [294,295], Кофмана А. [114], Крумберга О.А. [115], Ларичева О.И. [121-124], Мамдани Е.Х. [306-308], Мелихова А.Н. [136], Миронова А.Н. [140-144], Мицумото М. [145,310-313], Налимова В.В. [150,151], Нариньяни А.С. [152-155], Орловского С.А. [164], Охтилева М.Ю. [167-169], Поспелова Д.А. [3,58,97], Павлова А.Н. [170,171], Поспелова Г.С. [178], Прада Х. [81,281-284], Прангишвили И.В. [182], Резникова Б.А. [191], Соколова Б.В. [208-211,318], Сугено М. [183,319], Ульянова С.В. [23,267], Юсупова Р.М. [168,211,278] и многих других авторов.

В различных зарубежных странах созданы и успешно работают широко известные научные школы, среди которых можно выделить американскую (Заде Л.А., Беллман Р.Е., Чанг С. Л. и др. – основы нечетких множеств и нечетких топологических пространств), японскую (Сугено М., Мамдани Е.Х. – нейро-нечеткие принципы моделирования и управления СЛО), французскую (Дюбуа Д., Прад Х. – теория возможностей в нечетких системах), рижскую (Алексеев А.В., Борисов А.Н., Крумберг О.А. – принятие решений в условиях неопределенности). Из отечественных научных школ – московскую (Поспелов Д.А., Аверкин А.И., Нариньяни А.С. – основы искусственного интеллекта, принцип НЕ-факторов), петербургскую (Юсупов Р.М., Соколов Б.В., Миронов А.Н., Павлов А.Н., Дмитриев А.К., Охтилев М.Ю., Гаврилова Т.А. и др. – основы квалиметрии моделей и полимодельных комплексов, оценивание состояния СЛО в условиях неопределенности).

Вместе с тем, к сожалению, до сих пор на конструктивном уровне не решена проблема формального описания как самих СЛО, так и процессов их функционирования в динамически изменяющейся обстановке. Также недостаточно разработан научно-методический аппарат (методы, алгоритмы, методики) комплексного оценивания и прогнозирования состояния рассматриваемых классов

СЛО в условиях воздействия различных видов возмущающих факторов, сведения о которых слабо структурированы, а в некоторых случаях даже и противоречивы.

Проведенный в диссертации анализ широкого класса существующих методов принятия решений в различных областях науки и техники позволил выделить трудноразрешимую проблему *извлечения, представления и формализации экспертных знаний*. При этом существующая концепция *извлечения и манипулирования экспертной информацией путем синтеза продукционных правил* привела к существенному прорыву в области принятия решений. Предложенная ранее имплицативная форма продукционных правил «если ..., то ...» позволяет создавать условия для представления экспертных знаний в виде, например, «ситуация – действие», «состояние – оценка» и др. Однако на практике отсутствие внутренней структуры совокупности продукционных правил приводит к неоправданно большому их количеству. Такое «проклятие размерности» затрудняет использование продукционных правил и требует своего разрешения для многофакторных процессов и явлений, особенно при необходимости получения оценок состояния СЛО в реальном масштабе времени [97,168].

Создание теоретических основ работы с нечеткой информацией требует новых форм представления экспертных знаний. Следует учитывать, что наиболее высокий уровень формального представления и манипулирования знаниями гарантируется соответствующей семантикой языка, но и ему всегда присущи нечеткость и неопределенность. Кроме того, протекающие в СЛО процессы (например, деградация СЛО или изменение влияния внешней среды), для моделирования которых, в основном, и строятся экспертные системы, являются сложными вследствие трудноформализуемости, заведомой нестационарности, нелинейности и слабой структурированности. Особенность же процессов принятия решений о состоянии СЛО заключается в том, что они объективно должны базироваться на выводах, полученных на основе обработки нечеткой информации с использованием нечетких правил [3-5,10,11,33,42-44,116,315,325-328].

В таком аспекте на первый план выступает проблема *формализации неявно-заданных причинно-следственных связей* на основе явных и неявных экспертных

знаний о поведении СЛО в любом доступном для компьютерной обработки виде, в том числе и аналитическом.

Поскольку функционирование СЛО практически всегда происходит в многомерных пространствах нечетких переменных, то факторное пространство и множество продукционных правил для описания поведения СЛО логично представлять с использованием элементов *теории нечетких множеств* в виде лингвистических переменных. Проблема же организации *внутренней логики* представления множества продукционных правил [97,114-116] для достижения минимизации количества обращений к эксперту возможна на основе использования методов *теории планирования экспериментов* [6,7,32,48,150,223,224]. Так, в четком метрическом пространстве теория планирования экспериментов структурирует логику проведения экспериментов по ортогональным планам в виде специальных матриц планирования, обладающих свойством ротатабельности, и допускает последующее представление информации в виде полиномиальной модели. Поэтому особую актуальность приобретают задачи теоретического доказательства возможности применения аналогичной процедуры к обработке явных и неявных экспертных знаний, представляемых, например, в виде лингвистических переменных.

Таким образом в результате проведенного анализа современного состояния исследований в рассматриваемой предметной области и основных тенденций развития существующего специального модельно-алгоритмического обеспечения решения задач оценивания, оптимизации, управления, принятия решений и обработки данных, информации и знаний о состоянии СЛО, можно сделать вывод, что проблема разработки моделей и методов представления, формализации и использования явных и неявных экспертных знаний для оценивания состояния указанных объектов на основе нечетко-возможностного подхода является **новой** и весьма **актуальной**.

Схематично наличие объективно существующих противоречий в рассматриваемой предметной области и порожденной ими научной проблемы показано на рисунке 1.



Рисунок 1 – Решаемая в диссертации научная проблема

В настоящем исследовании предлагаются методы, модели и алгоритмы количественного оценивания состояния СЛО в условиях существенной неопределенности на основе формализации и использования явных и неявных экспертных знаний, описываемых нечеткими продукционными правилами.

При этом реализуется идея, что если человек принимает решение, то модель принятия решения уже есть в его сознании и нужно только оттуда ее извлечь. Разработанные в диссертации методология, методическое обеспечение и технология позволяют извлекать экспертные знания, формально представлять их в виде аналитических выражений, описывающих интуитивно-словесные и неявно-заданные экспертные знания о состоянии СЛО, а также на конструктивном уровне использовать указанные знания при решении широкого спектра практических задач, связанных с анализом и прогнозированием состояний рассматриваемых объектов.

Целью диссертационного исследования является разработка моделей и методов представления, формализации и использования явных и неявных экспертных знаний для оперативного и обоснованного оценивания состояния сложных объектов на основе дальнейшего развития нечетко-возможностного подхода.

В соответствии с поставленной целью в работе сформулированы следующие *основные научно-технические задачи*:

1. Провести системный анализ существующих и перспективных подходов к формализации и последующему решению проблем разработки научно-методического обеспечения оценивания состояния СЛО на основе экспертных знаний в условиях неопределенности.

2. Разработать концепцию оценивания состояния СЛО в условиях неопределенности с использованием явных и неявных экспертных знаний на основе дальнейшего развития нечетко-возможностного подхода.

3. Разработать методологические и методические основы построения и использования нового класса нечетких моделей для оценивания состояния СЛО на основе использования явных и неявных экспертных знаний. Для этого должны быть решены следующие частные подзадачи:

3.1 Разработка комбинированного метода извлечения и формализации явных и неявных экспертных знаний для оценивания состояния СЛО на основе дальнейшего развития нечетко-возможностного подхода и теории планирования экспериментов.

3.2 Разработка методов задания новых симметризованных форм представления нечетких чисел, а также расширенных и дополнительных арифметических действий над ними, сохраняющих исходный уровень нечеткости знаний экспертов.

3.3. Разработка методики и критериев проверки адекватности и полезности моделей оценивания агрегированного (обобщенного) состояния СЛО на основе экспертных знаний.

4. Провести экспериментальную апробацию теоретических исследований при решении задач оценивании состояния СЛО в реальных условиях.

С учетом вышеизложенного *объектом диссертационного исследования* являются различные классы материальных и нематериальных СЛО естественного и искусственного происхождения.

Предметом исследования являются модели и методы извлечения, представления, формализации, обработки, анализа и использования явных и неявных экспертных знаний для оценивания состояния СЛО в условиях неопределенности.

Методы исследования. В качестве основных использованы методы системного анализа, фундаментальные положения теории принятия решений, теория надежности, теория нечетких множеств и отношений, теория планирования экспериментов, теория многокритериального выбора, вероятностно-статистические методы, имитационное моделирование.

Научная новизна полученных в диссертационной работе результатов состоит в следующем:

1. Разработаны концепция и метод формализованного описания интуитивно-словесных и неявно заданных экспертных знаний о состоянии СЛО на основе дальнейшего развития нечетко-возможностного подхода и теории планирования экспериментов, которые, **в отличие от известных подходов**, позволяют использовать дополнительную неколичественную (вербальную) экспертную информацию для построения математических моделей оценивания состояния СЛО. При этом представляется возможным выявление как явных, так и неявных экспертных знаний, отражающих накопленный опыт эксперта при эксплуатации конкретных СЛО с учетом неопределенностей их состояния и условий функционирования, что существенно повышает оперативность и обоснованность принимаемых управленческих решений.

2. Разработаны и доказаны правомерность применения новой симметризованной формы представления нечетких чисел (LR)-типа и унифицированной формы записи расширенных и дополнительных

арифметических операций над ними, нечувствительных к знаку нечетких чисел, **отличающихся от общепринятых форм** тем, что вместо трех формул для каждой из арифметических операций в зависимости от сочетания знаков нечетких чисел можно обходиться только одной. Такое нововведение существенно упрощает работу по формализации экспертных знаний в виде лингвистических переменных для последующего их анализа и принятия решения при оценивании состояния конкретного СЛО.

3. Обобщены, расширены и исследованы свойства дополнительных арифметических операций, введенных методами символьной математики, для сохранения первоначальной нечеткости и приведения подобных членов при обработке массивов знакопеременного ряда нечетких чисел (LR)-типа в симметризованной форме, которые, **в отличие от традиционных подходов**, позволяют компенсировать увеличение нечеткости, сохранить исходную информативность конечного результата, что соответствует здравому смыслу операторов, использующих указанные данные на практике, и составляет научно-основу для решения проблемы построения аналитических моделей с привлечением экспертных знаний.

4. Введен новый класс нечетких моделей для оценивания состояния СЛО, построенных на основе комбинации методов нечетко-продукционного подхода и теории планирования экспериментов, который, **в отличие от традиционно используемых подходов** к оцениванию состояния СЛО, дает возможность распространения методов теории планирования экспериментов на область теории нечеткой логики с возможностью формализации экспертных знаний аналитическим выражением.

5. Разработан способ задания нечеткой нормы в виде модуля нечеткого числа (НЧ) (LR)-типа в нечетких метрических пространствах на множестве НЧ, который позволяет различать классы состояния СЛО на основе экспертных знаний, **отличающийся от существующих** методических подходов тем, что устраняет неоднозначность определения расстояния в многомерных пространствах нечетких переменных функционирования СЛО для оценивания различия между его

состояниями. При этом в формализованном виде модель принятия решения, базирующаяся на знаниях экспертов и отражающая их опыт и интуицию, может быть оперативно представлена также в виде аналитического выражения для нахождения количественных характеристик состояния СЛО в многомерном пространстве нечетких переменных с последующим отнесением этой оценки к определенному классу состояний СЛО.

6. Разработаны методика и критерии оценивания адекватности и полезности расчетов состояния СЛО с использованием построенных полиномиальных моделей с учетом нечетких данных об особенностях функционирования СЛО и заданных условий эксплуатации. Введенные критерии, **в отличие от известных**, предоставляют ЛПР возможность априорного оценивания несмещенности и эффективности получаемых с помощью полиномиальных моделей оценок. Наиболее предпочтительно применение разработанных методики и критериев в тех ситуациях, когда факторное пространство состоит исключительно из качественных переменных.

7. Разработаны оригинальные прикладные методики решения различных классов прикладных задач оценивания и прогнозирования состояния конкретных СЛО на основе явных и неявных знаний, **отличительной особенностью** которых является существенное сокращение времени и ресурсов на разработку и использование соответствующих нечетко-возможностных моделей принятия управленческих решений, связанных с оцениваем состоянием СЛО в динамически изменяющихся условиях, обеспечивающих повышение их обоснованности, а также сохранение и последующее использование знаний, полученных от высококвалифицированных специалистов, при исследовании и решении аналогичных классов задач в других предметных областях.

Теоретическая значимость диссертационного исследования состоит в следующем: обоснована возможность использования явных и неявных экспертных знаний для синтеза моделей оценивания состояния СЛО на основе дальнейшего развития нечетко-возможностного подхода; введены новые методы представления, формализации и использования нечетких чисел (LR)-типа и доопределены на

основе символической математики дополнительные арифметические операции над нечеткими числами знакопеременного ряда для сохранения исходного уровня нечеткости; разработан комбинированный метод построения моделей с учетом количественной и не количественной экспертной информации; разработаны модели представления интуитивно-словесных и неявно заданных экспертных знаний о состоянии СЛО в аналитическом виде и критерии проверки степени их адекватности и полезности.

Результаты теоретических исследований получили всестороннюю реализацию при решении практических задач оценивания состояния реальных СЛО в различных предметных областях.

Практическая значимость и реализация результатов работы

Результаты диссертационных исследований имеют междисциплинарный характер и представляют собой методологические и методические основы извлечения, представления, формализации знаний и использования опыта высококвалифицированных специалистов-экспертов о состоянии СЛО в аналитическом виде, что способствует повышению оперативности и обоснованности принятия соответствующих управленческих решений в условиях неопределенности. Практическое значение полученных результатов диссертационных исследований состоит в их доведении до уровня инженерных методик, которые позволяют извлекать и формализовать нечеткую (вербальную) экспертную информацию о состоянии конкретного СЛО в виде лингвистических переменных в виде лингвистических переменных для последующей структуризации и формализации указанных знаний при оценивании и прогнозировании состояния СЛО на основе тенденций (сценариев) изменения внешней обстановки.

С использованием предложенных инженерных методик и построенных моделей получены оценки фактического состояния широкого класса СЛО в различных областях науки и техники, что позволило обосновать принимаемые конкретные инженерные решения по оцениванию их состояния и прогнозированию рисков возможного разрушения, а также по дальнейшей эксплуатации СЛО.

При этом в ходе практической реализации диссертационных исследований были получены значительные положительные эффекты в различных предметных областях.

К указанным предметным областям можно, в первую очередь, отнести.

1. Космонавтика. В центре испытаний и контроля эксплуатации филиала ФГУП «ЦЭНКИ»-КЦ «Южный» при оценивании степени критичности наземных составных частей ракетно-космических комплексов по остаточному ресурсу. Реализация результатов диссертационной работы позволила *повысить точность прогнозирования* остаточного ресурса примерно в 1,7 раза при экономии в 1,5 раза времени на разработку экспертных прогнозов.

Для космодрома «Байконур» была разработана аналитическая модель для описания степени повреждения элементов газоотводов от воздействия запускаемых ракет космического назначения (РКН). На основе этой модели осуществлено прогнозирование рисков возникновения повреждений в количественном виде для заданного числа пусков РКН в предполагаемых благоприятных и неблагоприятных погодных условиях.

Для космодрома «Плесецк» создана интеллектуальная информационно-диагностическая система мониторинга оценивания технического состояния (ТС) химических источников тока (ХИТ) с использованием результатов тепловизионных наблюдений, позволяющая применять *методы неразрушающего контроля* и облегчить процедуру прогнозирования остаточного ресурса ХИТ. Получен патент РФ № 2467436 (Бюлл. № 32, 20.11.2012).

Разработаны методика и алгоритмическое обеспечение оценивания ТС объектов наземной космической инфраструктуры для ранжирования агрегатов и систем заправочного оборудования СК 17П32-6 РКН «Союз-2» (космодром «Байконур») по остаточному ресурсу.

В ФГУП «СКБ Титан» при выборе и обосновании методов оценивания остаточного ресурса разработанных систем объектов в составе ракетно-космических комплексов.

В войсковой части 85487 при оценивании и прогнозировании технического состояния наземных составных частей ракетно-космических комплексов.

Для космодрома «Байконур» разработан способ количественного оценивания степени развития дефектов при эксплуатации насосных агрегатов заправочного оборудования ракетно-космических комплексов. Способ защищен патентом РФ № 2673629 от 28.11.2018.

2. Цветная металлургия. В «ГМК «Норильский никель» в рамках выполнения НИР «Интеллектуальная автоматизированная система управления процессом плавки ПВ-3 Медного завода» синтезирована сложная многофакторная модель в виде семантической сети на специфичном ограниченном словаре с использованием полиномиального преобразования НЕ-факторов, суть которого состоит в представлении вербальных знаний эксперта в виде аналитического выражения, заданного с использованием нелинейной полиномиальной функции. Разработанная система 13 взаимосвязанных полиномиальных моделей различных уровней детализации и назначений описывает специфику работы пирометаллургического процесса, опыт и знания экспертов с использованием предложенного в диссертации нечетко-возможностного подхода. Получен патент РФ № 2 571 968 (Бюл. № 36 от 27.12.2015). Фактически в этом исследовании *реализован наиболее общий подход к решению проблемы распознавания и оценивания состояния СлО* в различных предметных областях – цветная и черная металлургия, горное и нефтегазовое производство, космонавтика, медицина, ветеринария, сельское хозяйство и др.

Применение усовершенствованного нечетко-возможностного подхода к построению модели пирометаллургического процесса обжига в кипящем слое на основе формализации знаний экспертов позволило повысить производительность промышленного агрегата на 25-30% и снизить количество предаварийных ситуаций. Получен патент РФ № 2204616 от 20.05.2003.

3. Строительное дело. В Заполярном филиале «ГМК «Норильский никель» и Норильском промышленном районе (г. Норильск) внедрены в практику следующие результаты диссертационного исследования.

На Медном заводе по разработанной методике мониторинга и прогнозирования состояний зданий и сооружений с пространственно-распределенной топологией получена модель оценивания остаточного срока службы дымовой трубы металлургического предприятия, эксплуатируемой в нештатных условиях. В результате удалось *повысить качество и обоснованность управленческих решений, связанных с эксплуатацией дымовой трубы, а также сохранить ее в работоспособном безаварийном состоянии в течение 12 лет.*

Разработана методика оценивания состояний зданий и сооружений, эксплуатируемых в условиях Крайнего Севера, на основании которой построены аналитические модели: потери несущей способности многолетнемерзлых грунтов промышленных и гражданских объектов вследствие техногенного воздействия металлургических предприятий; методика оценки и прогноза устойчивости русловой плотины хвостохранилища отходов автоклавного передела металлургического завода; дамбы хвостохранилища обогатительной фабрики, построенной на многолетнемерзлых грунтах Заполярья.

4. МЧС России. В Управлении по делам ГО и ЧС г. Норильска реализована методика в части оценивания технического состояния высоко рискованных спецсооружений, фундаментов зданий и сооружений. В результате реализации указанной методики была разработана предписывающая документация по снижению числа чрезвычайных ситуаций в Норильском промышленном районе.

5. Экология. В Норильском региональном отделении МАНЭБ внедрены и используются информационные и методические материалы для количественного оценивания *загрязнения металлами геокриолитозоны* Норильского промышленного района, прогнозирования устойчивости оснований, построенных на многолетнемерзлых грунтах плотины пирротинохранилища и дамбы хвостохранилища. Цель использования результатов диссертационных исследований состояла в *разработке планов мероприятий по сохранению экологической обстановки и предотвращении возрастания негативных факторов, влияющих не только на Норильский промышленный район, но и на экологическое состояние всего Таймырского полуострова.*

Создана экспресс-методика и на ее основе проведена оценка морфодинамических процессов в береговой зоне Финского залива.

Практическая значимость полученных в диссертационной работе результатов подтверждена актами реализаций в соответствующих организациях.

Положения, выносимые на защиту

1. Концепция оценивания состояния СЛО с использованием явных и неявных экспертных знаний на основе дальнейшего развития нечетко-возможностного подхода.

2. Методы представления, формализации и использования нечетких чисел (LR)-типа и введенные на основе символической математики дополнительные арифметические операции над нечеткими числами знакопеременного ряда для сохранения исходного уровня нечеткости явных и неявных знаний экспертов.

3. Комбинированный метод построения моделей оценивания состояния СЛО на основе формализации явных и неявных экспертных знаний.

4. Модели представления интуитивно-словесных и неявно-заданных экспертных знаний о состоянии СЛО в аналитическом виде.

5. Методика и критерии проверки адекватности и полезности разработанных моделей состояния СЛО.

6. Результаты применения теоретических исследований при решении практических задач оценивания состояния реальных СЛО в различных предметных областях.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и результатов подтверждается всесторонним анализом современного состояния исследований в предметной области, согласованностью результатов моделирования и проведенных расчетов с фактическими данными, полученными в процессе эксплуатации СЛО, апробацией основных теоретических положений, полученных в диссертации, в печатных трудах, статьях и докладах на международных и всероссийских научно-практических конференциях и семинарах.

Апробация результатов исследований. Результаты диссертационной работы докладывались на межрегиональных, всероссийских, международных научно-технических конференциях, семинарах и симпозиумах: «ГМК «Норильский никель» (Норильск, 1993-2000); Научно-технические межвузовские и межрегиональные конференции Норильского института (1993-2000); Всесоюзная школа «Математические методы в химической кинетике и теории» (Кызыл, 1991); Международный симпозиум «Проблемы комплексного использования руд» (С. Петербург, 1994); Proceedings of 2nd International Congress on Environmental Geotechnics (Osaka, JAPAN, 1996); Proceedings of 1st Australia-New Zealand Conference on Environmental Geotechnics GEOENVIRONMENT 97 (Melburne, AUSTRALIA, 1997); Proceedings of Geoenvironmental Engineering Conference CONTAMINATED GROUND: FATE of POLLUTANTS and REMEDIATION (Cardiff, UK., 1997); Proceedings of International Symposium Engineering Geology and the Environment (Athens, GREECE, 1997); Proceedings of 3rd International Congress on Environmental Geotechnics (Lisboa, PORTUGAL, 1998); 8th International Congress of International Association of Engineering Geology (IAEG) (Vancouver, CANADA, 1998); Международная научно-практическая конференция «Реконструкция зданий и сооружений. Усиление оснований и фундаментов» (Пенза, 1999); 13 Международная научная конференция. Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-2000 (Санкт-Петербург, 2000); Научно-практический семинар «Геокриологические и геоэкологические проблемы строительства в районах Крайнего Севера» (Норильск, 2001); III Кирилло-Мефодиевские чтения. Международная научная конференция (Луга, 2003); VI международная научно-техническая конференция «Проблемы прочности материалов и сооружений» (СПб, 2004); Международная научно-техническая конференция «Проблемы обеспечения безопасности при чрезвычайных ситуациях» (Санкт-Петербург, 2004); 10-я международная научно-техническая конференция «Моделирование, идентификация, синтез систем управления» (Ялта, п. Канака, 2007); VI и VIII международные научно-технические конференции «Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте» СПбГУПС (Санкт-Петербург, 2008,

2011); VIII-XIX Международные конференции «Мягкие вычисления и измерения SCM`2005 – SCM`2018» (Санкт-Петербург, 2005-2018); XXVII Межведомственная научно-техническая конференция космодрома «Плесецк» «Научно-технические аспекты совершенствования эксплуатации существующих и испытаний перспективных образцов ракетно-космической техники в современных условиях» (Плесецк, 2010)»; Международная научно-практическая конференция «Научное обозрение физико-математических и технических наук в XXI веке», (Москва, 2015); XXXI Межведомственная научно-техническая конференция «Развитие научно-технических аспектов методологии испытаний и эксплуатации с целью повышения эффективности применения существующих средств и систем экспериментально-испытательной базы» (Плесецк, 2015); Международный конгресс АПК – стратегический ресурс экономического развития государства: Материалы для обсуждения (СПб, 2015); Межвузовском научно-практическом семинаре «Современные направления развития технологии, организации и экономики строительства (28 апреля 2016)» (СПб, ВИ(ИТ) ВА МТО, 2016); Digital Transformation and Global Society. First International Conference, DTGS 2016, St. Petersburg, Russia, June 22-24, 2016; XVI Всероссийской конференции DICR-2017, Новосибирск, 4-7 декабря 2017 года. Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2017; Engineering for Rural Development. 16th International Scientific Conference. Maj 24-26, 2017. Latvia University of Agriculture, Faculty of Engineering. Jelgava, 24.-26.05.2017; Engineering for Rural Development. 17th International Scientific Conference. Maj 23-25, 2018. Latvia University of Agriculture, Faculty of Engineering. Jelgava, 23.-25.05.2018; Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова (Санкт-Петербург, 2018).

По теме диссертации опубликовано более 110 научных трудов, в том числе: 18 статей в изданиях, рекомендованных ВАК для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора технических наук, 4 патента РФ, 2 свидетельства на программы; 16 статей зарегистрированы в SCOPUS, издано 6 монографий, где соискатель является одним из соавторов,

остальные публикации – в научно-технических журналах и сборниках научных трудов.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложений, общим объемом 357 страниц, в том числе 328 источников литературы.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, проведен анализ исследуемой научной проблемы и обоснован подход к ее решению, определены цель и задачи диссертационного исследования, раскрыта научная новизна и практическая значимость полученных в диссертации результатов, а также приведены сведения об их реализации и апробации.

В первой главе проведен системный анализ проблемы сложности формального описания и оценивания состояния объектов произвольной природы. Показано, что независимо от принадлежности к той или иной области техники или науки СЛО обладают сходными признаками.

Проведено концептуальное и теоретико-множественное описание проблемы оценивания состояния СЛО и показано, что процесс создания соответствующих аналитических моделей, описывающих указанные состояния, состоит из трех последовательных взаимосвязанных процедур – извлечения знаний, их представления и собственно формализации. Сформулированы основные классы задач для решения поставленной проблемы в целом.

Во второй главе в ходе анализа действий с лингвистическими переменными выяснилось, что и форма представления, и арифметические операции над нечеткими числами (LR)-типа, которые предполагается использовать при решении проблемы оценивания состояния СЛО, требуют нового подхода. В целом проведенные *фундаментальные исследования* по выбору и обоснованию *новых форм представления нечетких чисел и арифметических операций над ними* заложили основу для практического использования *лингвистических переменных*, обеспечивающих представление экспертной информации в доступном для дальнейшей обработки виде. Лингвистические переменные входят в состав нечетких продукционных правил имплицативного типа «если...., то...», с

использованием которых можно на конструктивном уровне представлять явные и неявные экспертные знания при оценивании состояния СЛО в конкретной ситуации.

В третьей главе в целях конструктивного решения задачи выбора и обоснования метода формализации экспертных знаний, заданных множеством нечетких продукционных правил, разработана *концепция обобщенного (агрегированного) аналитического описания состояния СЛО в многомерном пространстве лингвистических переменных*. Реализация такой концепции открывает возможность совместного применения классических методов теории планирования экспериментов и современных методов инженерии знаний.

В четвертой главе на основе проведенных в предыдущих главах теоретических исследований изложены комбинированный метод построения моделей, методика и алгоритмическое обеспечение решения задач оценивания состояния СЛО *аналитическим выражением* в пространствах лингвистических переменных. На практическом примере продемонстрировано важное обстоятельство: в отличие от известных подходов *разработанный комбинированный метод* обеспечивает существенное сокращение времени и ресурсов, используемых при построении моделей, а также на принятие с их использованием своевременных и обоснованных управленческих решений, связанных с оцениваем состоянием СЛО в условиях существенной неопределенности.

В пятой главе приведена сводка методических и методологических основ решения проблемы синтеза моделей оценивания состояния СЛО на основе явных и неявных экспертных знаний, дающая общее представление о разработанных в диссертации подходах, методах, алгоритмах и моделях при решении возникающих задач. Кроме того, представлены результаты *однопараметрического оценивания состояния* трех СЛО в статических условиях для различных предметных областей. По двум исследованиям получены патенты РФ.

В шестой главе приведены результаты построения моделей многопараметрического оценивания состояния СЛО в динамических условиях.

Рассмотрены два примера построения интеллектуальных моделей управления производственными процессами. При этом с целью недопущения выхода реализуемого технологического процесса за регламентируемые пределы динамика изменений отслеживается в режиме реального времени. Построенные на основе явных и неявных экспертных знаний интеллектуальные автоматизированные системы управления процессами с использованием исходной информации от АСУ работают в режиме «советчика оператору». Методологическим новшеством является построение аналитических моделей для количественного определения переменных процесса, которые не существовали в характеристиках производственного процесса или объективно являлись неопределяемыми.

По результатам обоих исследований получены патенты РФ.

В основных результатах работы сформулированы теоретические и практические положения, достигнутые автором диссертационного исследования.

Автор считает своим приятным долгом выразить благодарность научному консультанту доктору технических наук, профессору Соколову Борису Владимировичу и доктору технических наук, профессору Павлову Александру Николаевичу за постоянное внимание к работе, в немалой степени способствовавшее написанию диссертации.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ И ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ЯВНЫХ И НЕЯВНЫХ ЭКСПЕРТНЫХ ЗНАНИЙ

1.1 ПРОБЛЕМА СЛОЖНОСТИ В ЗАДАЧАХ ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ПРИРОДЫ

В диссертационном исследовании понятия «сложные технические объекты» (СТО), «сложные явления», «сложные системы» (СС), в том числе и самого человека как хранителя и источника знаний, обобщены понятием «сложный объект» (СЛО).

Для отличия простых систем от сложных вводят несколько аспектов сложности [33,38,52,91,94,95,110,111,134,139,140,149,168,207-209]:

- *структурная сложность*, включающая количество элементов системы и взаимосвязей между ними;

- *сложность функционирования*, определяемая характеристиками множества состояний, правилам перехода между состояниями, взаимодействием с внешней средой, степенью неопределенности самих характеристик и их количественных оценок;

- *сложность развития и деградации*, определяемая изменением технического состояния (ТС) системы в жизненном цикле ее эксплуатации.

Проведенный анализ существующих и проектируемых сложных объектов как большого класса систем в ответственных приложениях (ракетно-космическая техника, автоматизированные системы и комплексы различного назначения и ведомственной принадлежности и т.п.) позволяет выявить схожие для них свойства и особенности функционирования.

Так, например, к классу СЛО относятся не только ракетно-космические комплексы (РКК), но и их наземные составные комплексы [39,61б, 81,102,121а,130,134,160,161,204,205,207,262]. Иерархия РКК показана на рисунке 1.1а. Аналогичная ситуация характерна и производственным процессам цветной металлургии, например, плавильный процесс Ванюкова (ПВ), рисунок 1.1б, которому подчинены подсистемы подачи сырья, дутья, энергетические и другие

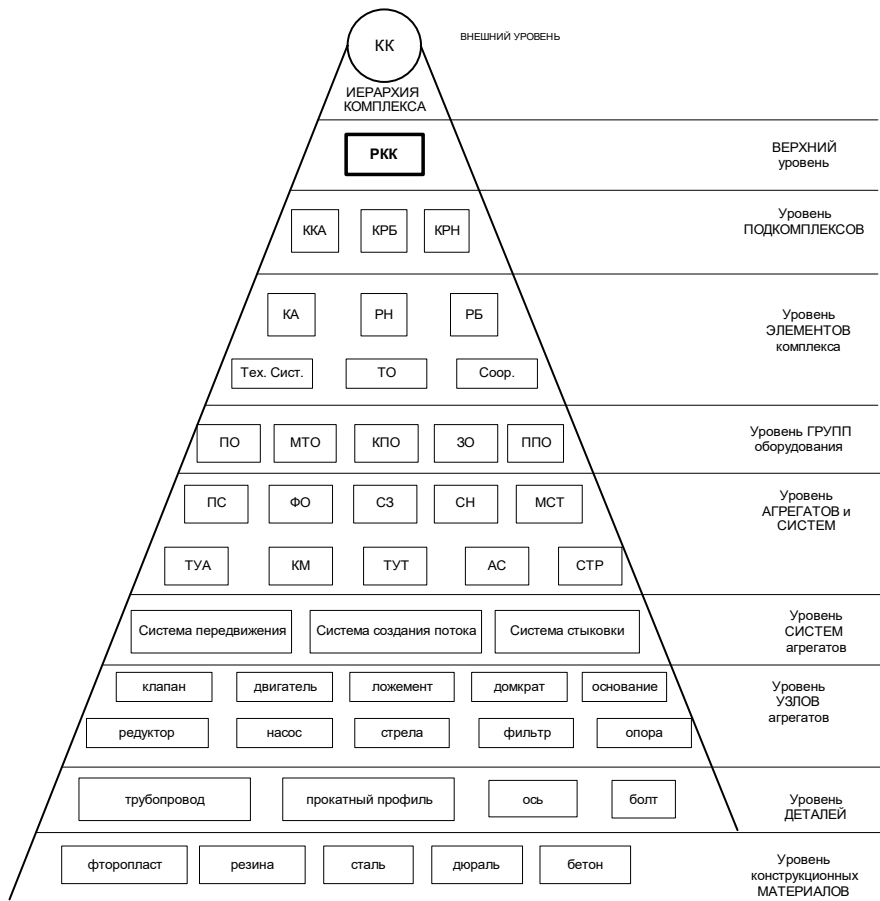
вспомогательные подсистемы [223,224,249,252,254,256]. Реализация процесса Ванюкова при переработке сульфидной медно-никелевой шихты производительностью до 160 т/час осуществляется при жесткой регламентации содержания меди в конечных продуктах – штейне и шлаке. При всем своем различии оба СЛО, представленных на рисунках 1.1 а и 1.1б, обладают схожими особенностями:

- наличием целевых задач;
- многофункциональностью и разнотипностью;
- высокими требованиями к уровню готовности выполнения поставленных задач, высокой ценой отказа;
- динамичностью функционирования в условиях существенной неопределённости.

Построение моделей состояния СЛО должно проходить в рамках системной интеграции их внутренних и внешних связей [14,16,18,142-144,159,161,167-169,172-174,193,195,196,212,214,216].

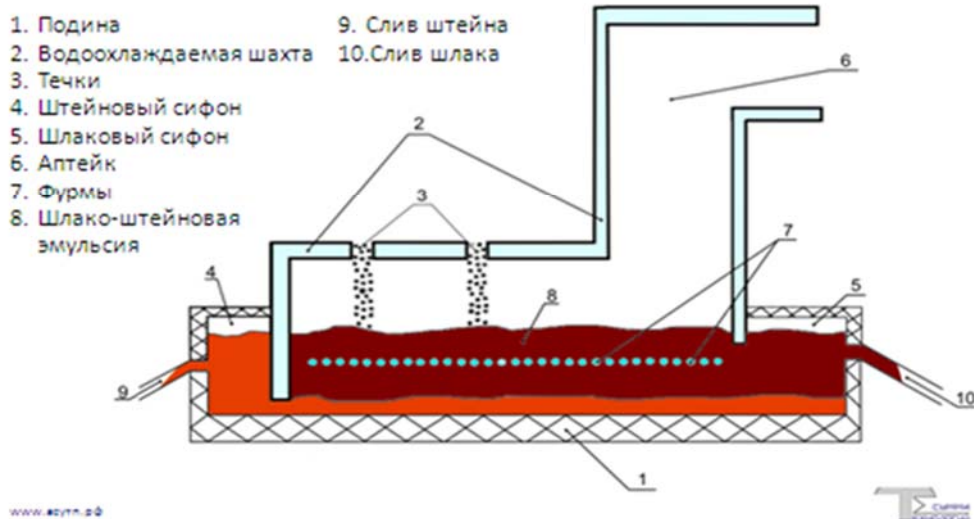
Так, например, одними из наиболее сложных и ответственных в иерархии РКК являются стартовые комплексы (СК) космического назначения. Под СК понимается совокупность стационарных и подвижных технических средств и сооружений, предназначенных для обеспечения готовности, подготовки пуска и пуска ракет космического назначения (РКН). При этом СК, принадлежащий по степени иерархии к уровню «подкомплексов» (рисунок 1.1а), сам является СТС со всеми присущими СЛО свойствами.

Все те же свойства автоматически переносятся и на случай управления печью Ванюкова (рисунок 1.1б) при условии, естественно, что их реализация целиком отвечает функциональному предназначению соответствующего СЛО.



а)

Печь Ванюкова



б)

Рисунок 1.1 – Примеры различных СЛО:

а – Иерархия технических средств ракетно-космического комплекса;

б – Схема печи Ванюкова для переработки сульфидных руд

Рассмотрим присущие СЛО системные свойства более подробно.

Целостность обуславливается необходимостью согласованного взаимодействия всех компонентов СЛО как единого целого в процессе целенаправленного функционирования в условиях взаимодействия со средой (обеспечения успешного пуска РКН; выпуск кондиционных продуктов ПВ) в изменяющихся условиях обстановки, связанных как с объективными (надежность оборудования), так и субъективными (деятельность людей) факторами [1,7,8,14-16,28,37,39,139,140,147,165,166,209].

Эмерджентность СЛО определяется наличием свойства, которое отсутствует у составляющих его составных частей и не сводится к аддитивной сумме их частных свойств [38,140-144]. Таким свойствами являются для СК способность запуска РКН, а для ПВ – реализация высокотемпературного автогенного физико-химического процесса Ванюкова.

Иерархичность построения обусловлена наличием в составе СЛО *различных* по значимости сложных систем, обеспечивающих выполнение основных технологических операций, вспомогательных операций и поддержание нормальных условий эксплуатации. Анализ СЛО с иерархической структурой требует применения принципа декомпозиции. Декомпозиция означает выделение в вышерасположенной иерархической структуре основных систем, агрегатов, узлов и элементов с последующим их анализом [38,39,109--112,139-142,169,210,211,224].

Для проведения анализа СЛО их обычно *декомпозируют* на группы элементов, объединенные по принципу единства функционального предназначения [21,28,79,88,89,94,95,110,112,130,147,199,202].

Учитывая тот факт, что для СЛО *загрузка целевыми задачами остаётся очень высокой*, а создание новых элементов, модернизация и восстановление ресурса существующих явно отстают от требований действительности, требования к готовности действующих СЛО становятся ещё более высокими [30,39,140,141,168,219,225,229].

Элементы и системы СЛО функционируют в условиях существенной неопределенности [3,11,12,14-16,27,41,42.50,51,73-75,85,100,113,120,127-

129,140,168,227,228,232,258,270]. Например, неопределенность оценивания состояния СЛО как сложной технической системы связана с неизбежной неполнотой знаний о фактическом состоянии его составных частей, неполнотой контроля на этапе функционирования, ограниченностью априорных сведений о надежности элементов оборудования систем СЛО и средств контроля состояния оборудования.

В большинстве случаев речь идет о статистической неопределенности. Традиционно рассматривают три вида такой неопределенности: частотный, объективистский и субъективистский [139]. Первые два вида различаются только точкой зрения на полученные статистические данные: частотный – как способ измерения неопределенности по результатам эксперимента, объективистский – как проявление случайной природы наблюдаемого события. Субъективистский взгляд отражает опыт субъекта, приобретенный в результате наблюдения за объектом. Важным здесь является различие понятий «экспериментатор» и «эксперт». При изучении явления в отличие от экспериментатора, получающего данные в результате проведенного эксперимента, эксперт использует свои знания и неформализованный опыт.

Высокие требования к надежности и безопасности функционирования вызывают необходимость углубленного систематического мониторинга состояния всех составных частей СЛО. Так, в силу целостности СЛО, его элементы или составные части обладают высокой степенью связности, поскольку сами являются потребителями некоторых услуг. Например, рассматриваемые СЛО нуждаются в таких услугах как связь, энерго-тепло-водоснабжение и водоотведение. Это вызывает необходимость оценивания состояния и прогнозирования остаточного ресурса всех элементов СЛО. Особую важность при этом приобретают задачи достоверного определения текущего состояния оборудования, планируемого к повторному применению, и его реального остаточного состояния СЛО [1,25,27,28,30,38,46,73, 98,110,119,140-144,147,170,196,197,203-205,211,263].

Анализ обширной научно-технической литературы свидетельствует, таким образом, что к настоящему времени практически все промышленно-технологические производства и процессы обладают признаками СЛО.

Во введении были даны определения состояния и технического состояния СЛО, а также различий между ними. При этом следует особо отметить, что на практике при оценивании технического состояния СЛО всегда используют как количественную (измеряемые приборами), так и неколичественную (вербальную, органолептическую) информацию.

Под состоянием СЛО в конкретный момент времени будем понимать множество его существенных параметров (характеристик), позволяющих ЛПР своевременно и обосновано принимать решение о его работоспособности (неработоспособности) и возможности его использования по назначению.

Техническое состояние объекта, согласно ГОСТ 20911-89 [65], – состояние, которое характеризуется в определенный момент времени, при определенных условиях внешней среды значениями параметров, установленных технической документацией на объект.

В свою очередь, в данном исследовании под техническим состоянием СЛО в конкретный момент времени понимается агрегированное (обобщенное) состояние, определенное по совокупности неколичественных или количественных значений существенных параметров, установленных технической документацией на объект, позволяющее отнести его состояние к одному из заранее определенных классов [7,57,94,95,139,132,168-170,192,215,235].

1.2 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К ОЦЕНИВАНИЮ СОСТОЯНИЯ СЛОЖНОГО ОБЪЕКТА

1.2.1 Вероятностные, статистические и физико-статистические методы

Моделирование оценивания состояния СЛО можно рассматривать как процесс, реализуемый на основе различных подходов; детерминированного, статистического, физико-статистического и нечетко-возможностного.

Детерминированные модели обычно применяют в виде систем линейных, нелинейных и дифференциальных уравнений. Однако их использование для оценивания состояния СЛО, которые, как правило, относятся к трудноформализуемым, существенно ограничено [19,140-144, 152,162,163,223,224].

Статистико-вероятностный подход. Наиболее часто используемый при моделировании исследуемых явлений статистико-вероятностный подход, основой которого является метод наименьших квадратов (МНК), который исключительно прост в связи с хорошо разработанным математическим и программным обеспечением решения соответствующих задач наблюдения. Однако простота и доступность использования МНК при наличии достаточно больших выборок не страхует исследователя от грубых ошибок. Недостатком, кроме регламентируемых ограничениями применения МНК со статистической точки зрения [17,18,137,150,151,162,163,224,225], таких как репрезентативность выборок или симметричность распределений переменных, является также невозможность предсказания появления возможных «скачков» состояний СЛО при их мониторинге в будущем. Такую характерную для объектов ситуацию, когда при плавном изменении внешних условий в состоянии объекта наблюдается скачок, называют катастрофой [26,179].

Различные модификации методов оценивания состояния СЛО на основе *вероятностного подхода* приведены во многих публикациях [8,9,24,25,37,38,44-47,53,56,60,68,69,139, 146,193,196, 197,202,205,206,260,270]. Однако не всегда соблюдаются все условия для получения корректных моделей оценивания состояния СЛО.

Модели и методы оценивания состояния СЛО на основе статистических данных обладают известными преимуществами и недостатками, что определяет границы их применения. Содержания указанных ограничений состоят в следующем:

– часто делают очень сильные и не всегда оправданные допущения, например, о том, что поведение объекта статистически определимо и на основании

этого могут быть разработаны вероятностные модели поведения СЛО, несмотря на многочисленные предупреждения математиков об осторожности в приложении статистических методов к описанию указанных классов объектов [8,17,18, 37,54,55,97,162,163];

– статистические данные, с одной стороны, представлены, как правило, большими объемами с малым уровнем дискретности по многим переменным (например, при управлении процессом Ванюкова), что обуславливает необходимость отбора и агрегирования соответствующих данных и информации, а также обеспечение их представительности [223], а с другой – при крупномасштабных реализациях, например, повреждение металлооблицовки после пусков ракет космического назначения, существенной может оказаться малый объем выборки и необходимы другие способы оценки адекватности модели [66];

– многие производственные процессы реализуются в многомерных пространствах, описываемых множеством переменных, которые, как правило, мультиколлинеарны. Это приводит к некорректности статистических моделей [212], которые можно рассматривать только как интерполяционные формулы [137];

– без предварительной обработки числового материала, направленной на создание репрезентативных выборок, регрессионный и корреляционный анализы могут приводить к некорректным выводам [17,18, 150,151,212, 223];

– по мнению некоторых ученых достоверное прогнозирование состояния СЛО возможно только на основе оценивания локальных состояний развивающейся системы [9, 162,1163].

Однако статистический подход к обработке результатов наблюдений доступен практически во всех областях науки и техники [17,18, 103,135,137,151,163].

Обобщением процедуры построения моделей оценивания состояния СЛО на основе статистических данных можно считать *метод группового учета аргументов* (МГУА) – метод порождения и выбора регрессионных моделей оптимальной сложности [71]. МГУА рекомендуется к использованию в том случае,

когда выборка содержит несколько переменных, что делает его привлекательным для построения моделей оценивания состояния СЛО.

Базовая модель назначается, например, в виде полинома Колмогорова-Габо́ра:

$$y = w_0 + \sum_{i=1}^m w_i x_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m w_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m w_{ijk} x_i x_j x_k + \dots$$

где $x = \{x_i\}$, $i = 1, \dots, m$ – множество свободных переменных;

w – вектор параметров весовых коэффициентов

$$w = \langle w_i, w_{ij}, w_{ijk}, \dots | i, j, k, \dots = 1, \dots, m \rangle.$$

Целью МГУА является получение модели в результате перебора моделей возрастающей сложности из индуктивно-порождаемого множества. Параметры каждой модели настраиваются по МНК так, чтобы доставить минимум выбранному внешнему критерию. Из моделей-претендентов выбираются лучшие в соответствии с выбранным критерием. В случае применения многорядного МГУА на каждом последующем ряде новые модели порождаются как суммы всевозможных пар выбранных моделей предыдущего ряда. Порожденные модели снова настраиваются, выбираются наилучшие.

При всей кажущейся простоте самой идеи, алгоритм МГУА в конечном итоге сводится к перебору всех возможных сочетаний из множества переменных и их выбранных (субъективно) степеней в порождающих моделях. При порождении моделей необходимо выбирать из 2^{F_0} моделей, где F_0 – число всех переменных, включая и нелинейные их сочетания. Тогда при количестве переменных $n = 5$ и степени полинома $m = 3$ число порождаемых моделей составит 2^{26} , что чрезвычайно затрудняет выбор их оптимального количества и качества. Поэтому авторами введено несколько критериев и эвристических алгоритмов, позволяющих сократить время вычислений без уменьшения максимальной сложности моделей.

Вместе со сложностями реализации МГУА для нужд построения моделей оценивания состояния СЛО не следует забывать еще и о природе исходных выборок как результатов «пассивного эксперимента» [151,152] со всеми вытекающими негативными обстоятельствами, о которых шла речь выше. В силу подобных

обстоятельств при моделировании состояния СЛО применимость МГУА теоретически возможна, но практически – проблематична.

Сущность *физико-статистического подхода* заключается в выявлении и описании устойчивых необратимых закономерностей изменения внутренних свойств конструктивных элементов объекта под воздействием дестабилизирующих факторов различной природы, выделении определяющих параметров, характеризующих эти изменения, и доступных для инструментального (приборного) контроля в процессе эксплуатации, построении формализованных моделей взаимосвязи данных параметров с показателями, характеризующими состояние СЛО, и осуществлении прогнозирования их по результатам периодического контроля определяющих параметров. Реализация физико-статистического подхода требует существенных затрат времени, средств и соответствующего уровня квалификации специалистов [57,89,144,162,166,184,199]. Физико-статистические подходы могут быть использованы для оценивания состояния только части элементов и устройств из состава оборудования СЛО, причем рассматриваемые объекты, как правило, предполагаются невозстанавливаемыми.

Преимущество физико-статистического подхода перед статистическим заключается в переходе от неопределённости знания характеристик группы объектов в широком спектре условий эксплуатации к неопределённости знаний характеристик ресурса конкретного объекта в конкретных условиях эксплуатации [118,139,141]. Однако физико-статистическому подходу присущи практически все недостатки и особенности применения характерные для статистических методов.

1.2.2 Методы оценивания состояния СЛО с использованием экспертных знаний

Привлекательность использования экспертных знаний возрастает с пониманием того, что в условиях повышения сложности технологических процессов повышается и сложность моделей управления ими.

Современные *методы анализа экспертной информации* систематизированы в таблице 1.1 как инструмент получения корректных результатов исследований [140,167,168,176,182,184,191,204,205].

При этом повышение качества оценивания состояния СЛО на основе экспертных знаний видится в использовании принципов системности [1,8,9,40,59-61,94-99,124,125,217,223,224,231,264-266,317].

Однако направленность на использование экспертных знаний сдерживается тем обстоятельством, что, по мнению ученых [121-124,138,261,271], человек при принятии управленческих решений в СЛО оперирует в основном словами, а не числами.

Объемную информацию всегда стараются свернуть, сжать до уровней, способствующих ее восприятию человеком, пониманию ее смысла и последующего применения для выработки решения. Без применения методов агрегирования, с одной стороны, процедура формализации экспертных знаний невозможна в принципе, а с другой, – применение неэффективных процедур приводит к ошибкам управления с потерей оперативности и, в конечном счете, эффективности функционирования самого СЛО.

В качестве процедур часто выступает ранжировка объектов как измерительная процедура по оцениванию интенсивности проявления оцениваемого качества.

Иными словами, следует подразумевать, что эксперта просят провести измерение в *линейной ординальной шкале*.

Здесь, однако кроется, несмотря на прямые указания и предупреждения математиков-статистиков, обычная и часто повторяемая ошибка в применении ординальных шкал. Дело в том, что *в порядковой шкале отсутствие операции сложения делает невозможным* вычисление простейших статистических характеристик, таких как средние, дисперсии, корреляционный или регрессионный анализ и др. [104,162,163,224,259]. В подобных случаях широко используют дополнительную информацию о возможных градациях, измеряемых по ординальной шкале, для сопоставления пунктам шкалы некоторых действительных

чисел, удовлетворяющих свойству монотонности и позволяющих говорить об измерении данного качества уже в числовой шкале.

Таблица 1.1 - Сводка методов анализа экспертной информации

Название метода	Содержание метода прогнозирования
Метод индивидуальной экспертной оценки	Метод прогнозирования, основанный на использовании в качестве источника информации оценки одного эксперта
Метод интервью	Метод, индивидуальной экспертной оценки, основанный на беседе с экспертом по схеме вопрос-ответ
Метод коллективной экспертной оценки	Метод прогнозирования, основанный на выявлении обобщенной оценки экспертной группы путем обработки индивидуальных независимых оценок, вынесенных экспертами, входящими в группу
Метод экспертных комиссий	Метод экспертной оценки, основанный на объединении в единый документ экспертных оценок прогнозов отдельных аспектов объекта, разработанных соответствующими экспертными группами
Метод коллективной генерации идей (метод «мозговой атаки»)	Метод экспертной оценки, основанный на стимулировании творческой деятельности экспертов путем совместного обсуждения конкретной проблемы, регламентированного определенными правилами: запрещением оценки выдвигаемых идей, ограничением времени одного выступления с допущением многократных выступлений одного участника, приоритетом выступления эксперта, развивающего предыдущую идею, оценкой выдвинутых идей на последующих этапах, фиксацией всех выдвинутых идей
Дельфийский метод	Метод экспертной оценки, основанный на выявлении согласованной оценки экспертной группы путем независимого анонимного опроса экспертов в несколько туров, предусматривающего сообщения экспертам результатов предыдущего тура
Матричный метод прогнозирования	Метод прогнозирования, основанный на матричной интерпретации экспертных оценок связей отдельных аспектов
Метод эвристического прогнозирования	Метод прогнозирования, основанный на построении и последующем усечении дерева поиска экспертной оценки с использованием эвристических приемов и логического анализа прогнозной модели
Морфологический метод прогнозирования	Метод прогнозирования, основанный на выявлении структуры ОП и оценке возможных значений ее элементов с последующим перебором и оценкой вариантов сочетаний значений
Метод построения прогнозного сценария	Метод прогнозирования, основанный на установлении последовательностей состояний ОП при различных вариантах прогноза фона

Пункты этой шкалы составляют уже множество чисел, а структура состоит из арифметических операций сложения и умножения и содержит отношение неравенства чисел. Такую процедуру перехода от линейной ординальной шкалы к числовой называют «арифметизацией» [162,259,269].

Возможность получения такого «числового образа нечисловой информации» позволяет уже широко применять для обработки результатов нечисловых (ординальных, вербальных) измерений наиболее развитые методы современной математической статистики, первоначально ориентированной только на числовую исходную информацию. Иными словами, принцип «арифметизации» обуславливает процедуру перехода от *линейной ординальной шкалы* к *числовой*, что *превращает* экспертные знания по данному конкретному вопросу в *обыкновенные числовые исходные данные*, которые возможно подвергать обработке статистическими методами с получением тех же средних, дисперсий, регрессионных коэффициентов, в том числе и методами планированного эксперимента. Однако такая возможность очень редко используется на практике из-за широко распространенного подхода все заменять «вездесущими баллами» (знаменитый «средний балл по аттестату»), пренебрегая использованием знаний специалистов в области обработки статистической, а тем более экспертной информации [162,269,270].

Одним из методов использования экспертных знаний является анкетирование. Ответы при анкетировании предпочитают получать по тем же ординальным шкалам порядка исследуемого признака (баллы), забывая об ограничении таких шкал. Такое положение дел связано с недостаточностью развития методов эффективного свертывания информации в многомерных пространствах.

Одним из наиболее распространенных приемов свертки показателей является приведение переменных x_i к стандартизованному безразмерному виду:

а) при *аддитивном свертывании* суммированию произведений с некоторыми, как правило, субъективно определяемыми весовыми коэффициентами α_i

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i,$$

причем накладывается дополнительное ограничение

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1;$$

б) при *мультипликативной свертке* перемножению

$$\eta = \prod_{i=1}^m x_i^{\beta_i}$$

с некоторыми, также субъективно определяемыми, показателями степеней β_i

$$\sum_{i=1}^n \beta_i = 1$$

или в линейном виде

$$\ln \eta = \sum_{i=1}^n \beta_i \ln x_i.$$

Вид свертки и значения коэффициентов определяются на основе инструкций или опыта, а в некоторых случаях – с учетом экспертных оценок. Получается, что при эвристических свертках эксперту в завуалированном виде «навязывают» *линеаризацию* между зависимой и независимыми переменными при аддитивной свертке или, что еще труднее для эксперта, между их логарифмами – при мультипликативной. Если учесть, что в сознании эксперта «не существует разложения по полочкам» в виду их отсутствия, то при таких свертках вполне вероятны некорректные оценки состояния СЛО. А это, в свою очередь, повышает риск инициации нештатных аварийных ситуаций в указанных объектах из-за «человеческого фактора» и, соответственно, огромных экономических потерь по их ликвидации [9,21,56,205,220,221,225,226,228].

Необходимость учета всех особенностей СЛО, о которых шла речь ранее, а также условий неопределенности, вызванных воздействиями внешней среды, приводит к значительным затратам времени на получение требуемых оценок и, как следствие, потере оперативности принятия решений экспертом или ЛПР при оценивании состояния СЛО, тем более в условиях нечеткости исходной информации. При этом, как уже указывалось ранее, «волевое» игнорирование объективно существующей нечеткой (неколичественной) информации о состоянии СЛО, являющейся во многих случаях единственно доступной, приводит на практике к существенному огрублению данных и способствуют, как правило, получению четкого, но неверного результата [44].

Предупреждения математиков-статистиков об ограниченности применения порядковых шкал находят подтверждение также и в психологических исследованиях. Так, в работах [12,121-124] показано, что многие достаточно распространенные способы получения информации от человека, такие как *назначение весов признаков, баллов, вероятностей и т.д.*, являются *некорректными*: они ведут к противоречиям, смещениям, ошибкам. В качестве путей преодоления этих трудностей экспертам предлагают указать порядок их предпочтения. Однако, как было показано выше в п.1.2.1, такой путь имеет свои ограничения и не всегда применим при управлении СЛО или при принятии эффективных решений о состоянии СЛО.

В методе Саати [197] применяют матрицы попарных сравнений альтернативных оценок, после обработки которых информация выдается в виде оценки *предпочтений* сравниваемых признаков.

1.3 НЕЧЕТКО-ВОЗМОЖНОСТНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНИВАНИЮ СОСТОЯНИЯ СЛО

1.3.1 Использование нечетких лингвистических переменных при экспертном оценивании состояния СЛО

Задачи выработки и принятия решений о состоянии СЛО справедливо относят к *неструктурированным* или *слабоструктурированным*. При этом по

отношению к использованию экспертных знаний для решения аналогичных задач существует довольно жесткое ограничение: «Эксперт может при сравнении двух объектов, сказать, какой из двух лучше (метод парных сравнений), дать им оценки типа «хороший», «приемлемый», «плохой», упорядочить несколько объектов по привлекательности, но обычно не может ответить, во сколько раз или на сколько один объект лучше другого. *Распространенное заблуждение состоит в том, что ответы экспертов стараются рассматривать как числа*, занимаются произвольной «оцифровкой» их мнений, приписывая этим мнениям численные значения – баллы, которые потом обрабатывают с помощью методов прикладной статистики как результаты обычных физико-технических измерений. В случае произвольности «оцифровки» выводы, полученные в результате обработки таких данных, могут не иметь отношения к реальности» [162,163].

Возможность избежать подобной ошибки появляется в случае применения методов «арифметизации» вербальной экспертной информации. Рассмотрим подробнее процедуру «арифметизации» на примерах построения лингвистических переменных (ЛП), с использованием которых осуществляется извлечение и представление экспертных знаний.

При представлении той или иной компоненты вектора состояния Сло лингвистической переменной фактически устанавливается графическое соответствие переходов от *лингвистических* к *количественным шкалам*, как представлено на рисунке 1.2. Здесь определение степени нечеткости («размытости») понятия, в данном случае времени простоя оборудования в минутах, включает наименования мод (ранжированный ряд вербальных значений переменной от «небольшое» до «большое») и поставленные им числовые значения мод этих термов, а также коэффициенты нечеткости слева α и справа β для всех термов (по названию мод).

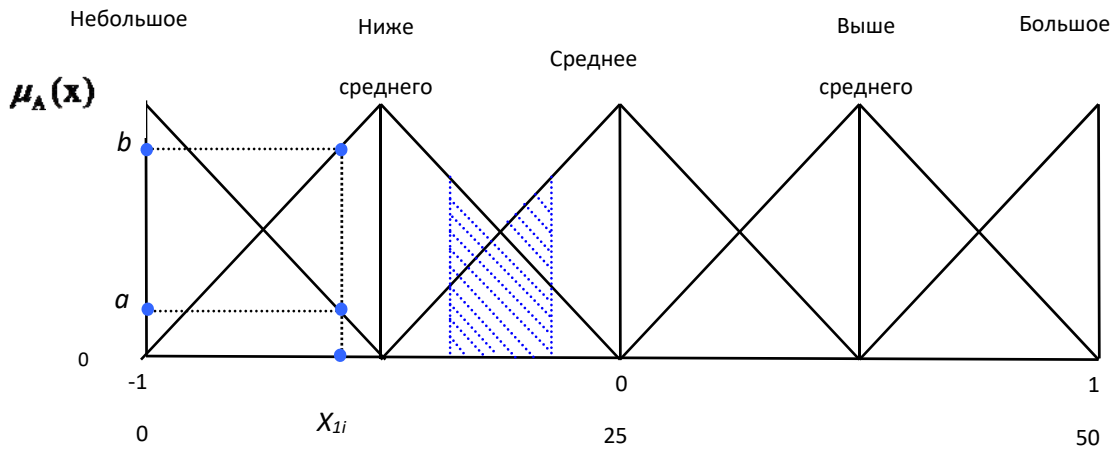


Рисунок 1.2 – X_1 – время простоев оборудования в минутах как лингвистическая переменная

Поясним рисунок 1.2 с точки зрения интерпретации нечётких шкал [7,27,156,223,224]. Рисунок предназначен для перевода лингвистических значений (ось абсцисс) переменной X_1 (верхняя шкала: «Небольшое – Большое») в количественные значения (шкала от 0 до 50 мин), а затем, при необходимости, и в кодированные на интервале $[-1,+1]$. По оси ординат расположена функция принадлежности $[0,1]$ как мера степени уверенности («правильности») перевода из одной шкалы в другую. Так, например, значению X_{1i} на оси ординат соответствуют два значения функции принадлежности $\mu_A(x_1)$: a и b . Поскольку $b > a$, то явно предпочтительнее отнести значение X_{1i} к моде «Ниже среднего». При попадании X_{1i} в заштрихованную зону, где значения $\mu_A(x_1) \approx 0,5$, то в указанной ситуации нельзя отдать предпочтение какой-либо из мод данного интервала, поэтому значение лингвистической переменной примет вид: между «Ниже среднего» – «Среднее».

Иной вид имеют неколичественные (вербальные) факторы. Рассмотрим, например, фактор – «марка применяемой стали» (рисунок 1.3).

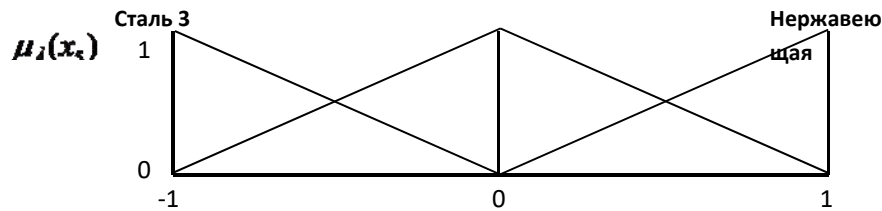


Рисунок 1.3 – Марка применяемой стали как лингвистическая переменная

Для неколичественных переменных концы оппозиционной шкалы маркируются «-1» и «+1», при этом середина шкалы для некоторых переменных условно принимается за «0», что может соответствовать высказываниям типа «ни ДА, ни НЕТ».

Поскольку переменная носит явно выраженный неколичественных смысл, то на концах оппозиционной шкалы она принимает значения только $\{-1,+1\}$. Поэтому определение границ оппозиционных шкал для каждой из неколичественных и/или количественных переменных выступает важным этапом в общей системе построения моделей.

Если лингвистическая переменная представляет собой выходную переменную Y , то она обязательным атрибутом содержит шкалу оценки зависимой переменной [6-8,27,69,223,224,239]. Для этого область определения Y разбивают на участки, где условным описательным характеристикам с нечеткими границами, полученными на основе диалога с экспертом, поставлены в соответствие количественные значения. Специальная графа в таблице поясняет смысл описательных характеристик для их однозначной интерпретации, о чем детальнее речь пойдет далее.

Оценка Y в условиях нечеткости исходной информации с использованием предполагаемой шкалы будет представлена, таким образом, уже в количественном виде. Это и есть «арифметизация» лингвистического шкалирования признака. Выбранный принцип ранжирования шкалы позволяет также сравнивать полученные результаты с показателями нормативной базы и оценками по расчетным моделям [223,224,259].

К сожалению, для большинства менеджеров, экономистов и инженеров подобные предостережения о некорректности «свободной» оцифровки, например, баллами, мало что значат, а сама прикладная статистика является пока экзотикой [162].

1.3.2 Лингвистическое представление нечетких продукционных правил

Развиваемые в последние десятилетия процессы построения продукционных правил имеют имплицативную структуру «Если, ..., То...». Продукционные правила представляют собой модель принятия решения в каждом конкретном случае. Целенаправленный опрос экспертов обычно приводит к построению соответствующей системы продукционных правил. В таких системах правило начинает работать за счет фильтрации базы фактов (условная часть «Если...» полностью описывающая текущую ситуацию), а сами продукционные правила в классических экспертных системах – это двузначная логика «да или нет» (правило *работает* или *нет*) [3-5,97].

Система нечетких продукционных правил как способ представления ЭЗ дает следующие *преимущества* [97]:

- можно моделировать лингвистическую информацию за счет представления смысловых оттенков;
- удается избегать дискретности продукционных правил, т.к. в классическом варианте полученные результаты могут сильно исказиться при переходе из одной ситуации в другую;
- правила работают и тогда, когда реальная ситуация точно не соответствует предусмотренной, что часто бывает на практике;
- нечеткая фильтрация позволяет провести классификацию числовых данных, когда соответствующие классы описываются именами нечетких множеств.

Однако всегда следует иметь в виду и присущие продукционным правилам *недостатки* [97,224]:

- *отсутствие внутренней структуры* наборов продукционных правил, не позволяющее получать эффективные конечные модели;

- зависимость шагов дедуктивного вывода от стратегии выбора, что делает их нередко трудно интерпретируемыми;

- *отсутствие механизма представления знаний* для некоторых СЛО;

- для многомерных СЛО *число productions чрезмерно велико*, что ведет к потере наглядности, утрате возможности верификации взаимодействия между правилами, потере гибкости в логическом выводе, трудоемкости формализации знаний.

Таким образом, достаточно эффективная по своей сути система продукционных правил нуждается в поисках методологии придания ей внутренней структуры.

Во-первых, в случае *представления условной части в виде лингвистических переменных* сами продукционные правила приобретают новый смысл в преломлении к целям диссертационных исследований, а именно – *извлечению и представлению экспертных знаний* на естественном профессиональном языке эксперта.

Во-вторых, систему продукционных правил можно рассматривать как матрицу, в которой каждое продукционное правило выступает строкой. Если значения каждой лингвистической переменной варьировать на двух уровнях (крайних значениях оппозиционной шкалы), то всю систему можно свести к матрице теории планирования экспериментов (ТПЭ) типа 2^n , где n – число переменных, обоснованно сократив при этом количество строк матрицы.

В-третьих, применение методов теории планирования экспериментов дает возможность получения полиномиальных моделей, если только выполняются основные требования к проведению экспериментов. Однако в случае применения лингвистических переменных как варьируемых факторов в теории планирования экспериментов возникают *проблемы получения четких границ в нечетких условиях и расползания нечеткости при арифметических действиях с массивами нечетких чисел (LR)-типа*.

Следует отметить, что в случае применения лингвистических переменных грамотная «оцифровка» экспертных данных как необходимый этап реализует «принцип арифметизации» (подпункт 1.4.2), без которого *принципиально*

невозможна какая-либо обработка экспертных знаний, где сам эксперт выступает «инструментом измерения» [3-5,11-13, 259].

Следует сделать замечание: сам *процесс извлечения и формализации знаний* в специальной литературе по данной тематике понимается в широком смысле и относится, как правило, к *извлечению знаний из любых источников* применительно к *целой отрасли знаний* или *ее части*. **Решение же конкретных задач на основе экспертных знаний применительно к оцениванию состоянию СЛО, функционирующих в многомерных пространствах нечетких переменных, в условиях реального времени освещен в научно-технической литературе слабо и не дает общей методики для таких целей.**

1.4 ДЕКОМПОЗИЦИОННО-АГРЕГИРОВАННЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ СЛО

1.4.1 Предъявляемые требования к моделям представления знаний

Анализ обширной литературы о «знаниях», например, по философии, психологии или информатике [3-5,12,42-44,58-60,138,152-155,193,261], позволяет сделать вывод об отсутствии однозначности данного понятия «Знания». Вместе с тем, каждый человек имеет свое представление, что такое «знание».

В бурно развивающейся *инженерии знаний* декларируется извлечение знаний из различных источников применительно к любой научной области. *Знаниями* в инженерии знаний принято называть *формализованную* в соответствии с определенными структурными правилами и *хранимую в ЭВМ* информацию, которая автономно используется при решении задач по таким алгоритмам, как *механизм вывода* [59].

Типичные модели представления знаний: логические модели; продукции; семантические сети; фреймы; сценарии; продукционные правила; нечеткие нейросетевые модели.

Вместе с тем, к моделям представления знаний (МПЗ) в любой области предъявляются общие и достаточно жесткие требования [57,168,211], которые

представлены на рисунке 1.4 (сокращения на рисунке: КП – конечный пользователь; МС – мониторинг состояния; СТО – сложный технический объект; ОА – объект анализа; ИзИ – измерительная формация).

Язык, используемый для разработки систем, спроектированных на основе этих моделей, называется языком представления знаний. Главным отличием интеллектуальных систем от других программных средств является существование так называемых *базы знаний* (БЗ) и *механизма вывода* [59, 168].

Представляется целесообразным подчеркнуть особенности процессов построения и использования моделей состояния СЛО, базирующихся на экспертных знаниях. В многомерных пространствах функционирования СЛО моделируемое состояние должно быть охарактеризовано некоторым представительным показателем, например, температурой в реакционной зоне плавильного агрегата. Однако состояние СЛО не всегда выражается конкретным физически измеряемым свойством, но это свойство эксперт может оценить вербально по своему опыту, например, «предаварийное» состояние. В обоих случаях показатель состояния СЛО представляется агрегированным (обобщенным, интегральным) по всей совокупности внутренних и внешних действующих факторов. Таким образом, оценивание состояния СЛО на экспертных знаниях способно учитывать нечисловую информацию об изучаемом процессе или явлении, что требует новых подходов не только к извлечению экспертных знаний, но и к неколичественным (органолептическим) характеристикам поведения СЛО в его эксплуатации.

Поскольку диссертационное исследование посвящено использованию экспертных знаний, то на передний план выступают прагматичные действия по извлечению и формализации только той части профессиональных знаний эксперта, которые необходимы для решения конкретных поставленных задач по оцениванию и прогнозированию состояния СЛО из области его деятельности [223, 259]. При этом в сознании эксперта база знаний и механизм вывода *не разделены*, как в компьютерных системах, что позволяет ему выступать в качестве «интеллектуальной информационно-измерительной системы» [239]. Такое

свойство человеческого разума стратегически обуславливает необходимость разработки технологии формализации экспертных знаний аналитическими выражениями со всеми его преимуществами.

Создание систем продукционных правил с использованием лингвистических переменных дает предпосылки к решению задач предметной области в целом на естественном языке эксперта без знания специального «языка представления знаний», включая правила, управляющие дополнительными подзадачами или дополнительными аспектами экспертной задачи (метазнания), графическим представлением. Построенные на экспертных знаниях и учитывающие свойства конкретного СЛО, такие «интеллектуализированные» модели выступают в качестве помощников операторов-технологов при управлении ими технологическим процессом, исключая необходимость разработки для этого специальных алгоритмов (рисунок 1.4, требование 1).

Конечный пользователь (КП) в принципе взаимодействует с моделями, построенными на экспертных знаниях, только опосредованно через созданную интеллектуальную экспертную систему, что соответствует принципу построения модели представления знаний (рисунок 1.4, требование 2), и обеспечивает потоковость вычислений при синтезированной программе (рисунок 1.4, требование 3), а использование нечетких экспертных знаний при создании моделей для экспертной системы обеспечивает проведение анализа ситуации в нечетких или недоопределенных условиях (рисунок 1.4, требование 4).

Таким образом, предлагаемые в диссертации научные основы разработки моделей и методов представления, формализации и использования явных и неявных экспертных знаний для оперативного и обоснованного оценивания состояния сложных объектов на основе дальнейшего развития нечетко-возможностного подхода соответствуют всем современным требованиям, предъявляемым к моделям и методам представления и обработки знаний.

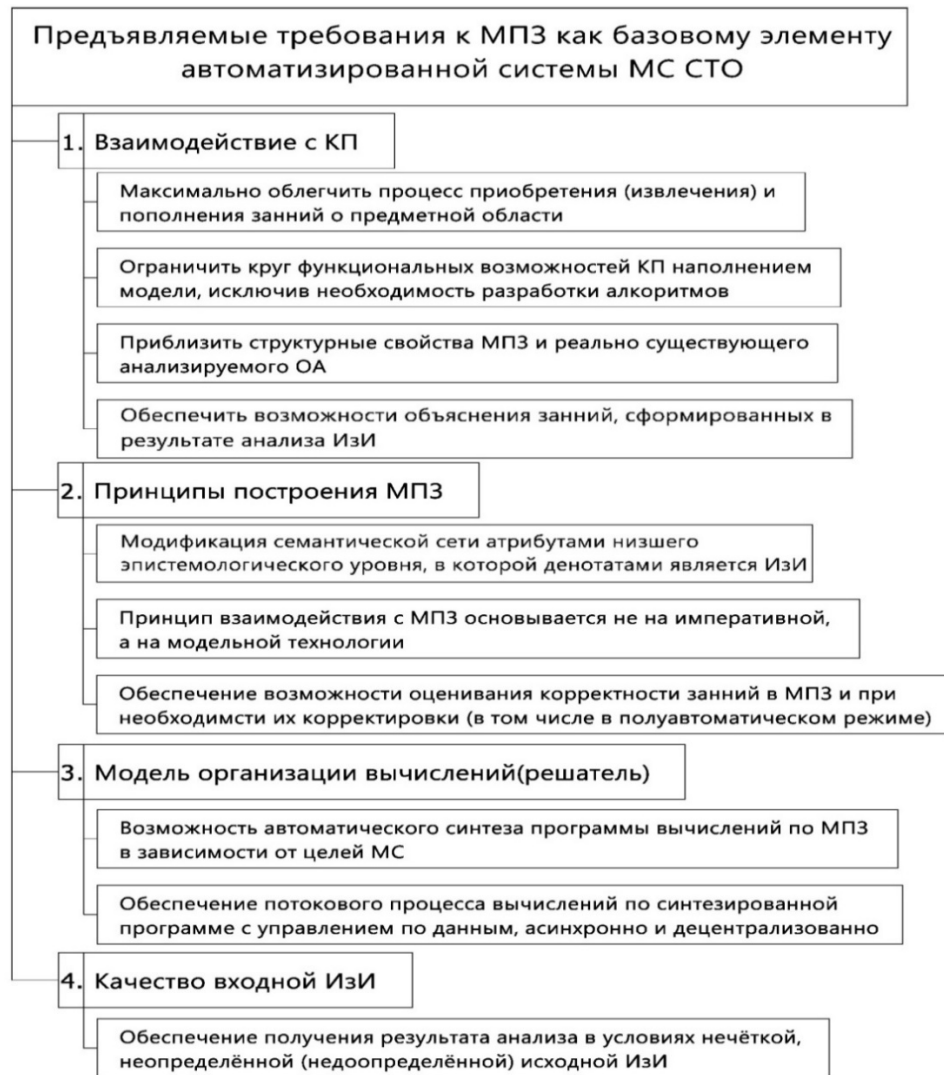


Рисунок 1.4 – Требования к моделям представления знаний

1.4.2 Особенности оценивания и прогнозирования состояния СЛО в условиях неопределенности

В настоящее время существует большое количество различных методов оценивания и прогнозирования состояния СЛО в условиях неопределенности [15,16,20,24,26,59-61,67,95,112,114,127,132,245,267,271,272,274-278,281-284].

СЛО функционируют, как правило, в присущих им многомерных факторных пространствах. Под факторным пространством понимается вся совокупность экзогенных и эндогенных переменных, определяющих специфичность его функционирования как целевой системы для выполнения определенного вида деятельности.

Общей тенденцией в эксплуатации и управлении СЛО является выработка и принятие решения *исключительно* человеком [121,122,138,140,159]. При этом правильность принятия решения во многом зависит от адекватной диагностики состояния СЛО. Данное состояние объекта в конкретный момент времени характеризуется неколичественными и/или количественными значениями наиболее существенных переменных. На основании оценивания состояния СЛО принимается решение, например, о продлении срока его эксплуатации.

Таким образом, возможность дальнейшей эксплуатации объекта полностью определяется его действительным состоянием и правильностью принятия решения экспертом (комиссией экспертов) о количественной оценке состояния СЛО на данный момент времени.

Следует отметить, что процессы изменения свойств СЛО при их эксплуатации в многомерных пространствах нечетких переменных (деградация) описаны пока недостаточно полно, для них не созданы удобные математические модели вычисления оценок состояния в числовом виде и до настоящего момента времени отсутствуют рациональные подходы к их созданию. На практике, однако, всегда есть специалисты, способные «чувствовать» малейшие нюансы изменения состояния СЛО и использовать эти знания в различных ситуациях. Таких высококвалифицированных специалистов обычно используют в качестве экспертов по данному конкретному объекту.

Как показывает анализ научно-технической литературы, принимаемые решения не всегда адекватны фактическому состоянию объекта [1,2,29,49,64,92], что иногда приводит к авариям, причем доля «человеческого фактора» в их инициации оценивается примерно 80% [20,56]. С целью снижения доли риска воздействия «человеческого фактора» создаются различные экспертные системы. В задачу таких систем как раз и входит адекватная диагностика состояния объекта и прогнозирование его поведения после принятия соответствующего решения.

Однако в условиях обработки неколичественной (вербальный, неизмеряемый) информации принятие решений вызывает затруднения, поскольку

не существует достаточно эффективных методик свертывания такой информации, а сами решения часто носят декларативный характер [72,75,87,88,99-103,118].

При этом особое внимание при решении задач рассматриваемых классов уделяется выбору факторного пространства, в котором эксперт принимает решение. Поэтому сформулируем следующие общенаучные требования, предъявляемые к выбору факторного пространства для обеспечения адекватности соответствующей модели, описывающей состояние СЛО [57-61,92,124,125,131,132,136]: системность в описании объекта моделирования; достаточность факторов; измеряемость (количественная и/или вербальная); понятный физический смысл и т.д.

В широко используемых на практике многомерных регрессиях, создаваемых на основе обработки статистических данных пассивного эксперимента, теряется смысл понятия «модель», поскольку в лучшем случае множественная регрессия может выполнять роль только интерполяционной формулы [137]. При этом последовательное увеличение количества переменных в линейной регрессии приводит, как правило, не только к искажению величины коэффициента регрессии, но даже к изменению знака влияния на противоположный [213,223]. В подобных случаях выбор переменных и их количество зависит от решаемой задачи и субъективных предпочтений самого исследователя.

В целом же проблема построения моделей оценивания состояния СЛО на основе экспертных знаний требует разработки принципиально новых научно-методических подходов, которые должны комплексно и системно учитывать все особенности их функционирования, включая все разнообразие исходных данных. Эксперт здесь выступает как «интеллектуальная измерительно-информационная система» [239].

Применительно к извлечению экспертных знаний все вышесказанное делает очевидным и необходимым *разработку новой системы опроса эксперта*, которая позволяла бы четко и однозначно отвечать на вопросы: «что» необходимо получить и «как» структурировать полученную информацию для решения сформулированной в диссертации проблемы об оценивании состояния СЛО. При

этом для проверки правильности суждений эксперта обязательно применять соответствующие критерии непротиворечивости их имеющихся у них знаний.

1.5 АНАЛИЗ И ОБОСНОВАНИЕ ВАРИАНТОВ ФОРМАЛИЗАЦИИ ЭКСПЕРТНЫХ ЗНАНИЙ ПРИ ОЦЕНИВАНИИ СОСТОЯНИЯ СЛО

1.5.1 Структурно-топологический подход к формализации задач оценивания состояния СЛО на основе экспертных знаний

Сложность не определяется только количеством элементов и связей между ними в системе, это только один из многих присущих ей факторов. Сложность как феномен требует расширения и выявления научно-системных парадигм для возможности управления сложностью. В науке управления сложностью в настоящее время разрабатывается концепция под названием «сетецентризм». Отметим, что термин «сетецентризм», введенный в обиход военными, трактуется в очень широком смысле и, как минимум, в его понятие включают [194]:

- повышение качества управления и формирование стратегий за счет знаний, форсайтов, прогнозов и синергетических воздействий в режиме упреждения;
- увеличение скорости принятия управляющих решений (скорость прохождения цикла от постановки задачи или обнаружения проблемы до их решения);
- создание материально-технической и методологической базы;
- избирательное, точечное и оптимальное решение возникающих задач;
- увеличение своей выживаемости (надежность и устойчивость системы управления, самого СЛО, материально-технической и методологической базы).

При этом выделяют два типа сложности [268] – вычислительную и когнитивную. В последнем типе источником сложности выступает устройство наблюдателя (мозг), а не наблюдаемого СЛО. Когнитивная составляющая сложности как важнейшая характеристика «нелинейности» интерпретируется в том смысле, что мозг успешно справляется только с теми сложностями, алгоритмы обработки которых человек приобрел в ходе своей эволюции, например, при распознавании образов.

Давно доказано, что мозг человека превосходит любые суперкомпьютеры в решении задач, связанных с обработкой нечеткой или неточной информацией. Поэтому использование экспертных знаний в различных областях науки и техники можно рассматривать как средство борьбы со сложностью. В пользу этого гласит фундаментальный закон необходимого разнообразия Р. Эшби – сложность можно победить только равной или большей сложностью [276]. Из этого закона следует неизбежно высокая сложность систем управления СЛО.

На практике, как следует из многочисленных публикаций, для борьбы со сложностью разработаны многие подходы и методы управления применительно к конкретным СЛО, функционирующих, как правило, в условиях существенной неопределенности, режимов жесткого ограничения времени на принятия решений, недостатка информации с не всегда предсказуемым исходом.

Как видно из такого понимания термина «сетцентризм», каждый из перечисленных пунктов представляет собой отдельное научное направление со своим методологическим и математическим аппаратом. Поэтому в настоящем исследовании рассматриваются только те вопросы, которые непосредственно связаны с решением диссертационной проблемы, а именно многофакторным оцениванием состояния СЛО на основе формализации экспертных знаний.

Известно, что многообразие способов построений систем управления СЛО консолидируется конструкциями более общего порядка – топологическими пространствами и структурами [168]. Так, в работе [262] предложен научно-методический аппарат формального описания состояния космических средств как СЛО. Рассматривается процесс принятия решения о техническом состоянии (ТС) бортовых систем ракет космического назначения по результатам проведенного контроля и диагностирования на теоретико-множественном уровне, как представлено на диаграмме рисунка 1.5. В [130,262] показано, что в общем виде модель анализа ТС как СЛО может быть представлена следующим кортежем:

$$\Sigma = \langle T, U, Y, X, g \rangle,$$

где T – множество моментов времени t , в которые наблюдается объект; U , Y – множества входных U и выходных Y сигналов соответственно; X – множество

состояний объекта, характеризуемое в каждый момент времени $t \in T$ набором переменных x_k , $k = 1, s$; g – оператор выходов, описывающий механизм формирования выходного сигнала как реакции объекта на тестовые и рабочие воздействия или внутренние возмущения, например, отказы отдельных элементов.

На рисунке 1.5 обозначены дополнительно: Y/\mathcal{E} – фактор-множество состояний СЛО; S – пространство шкал измерения входных и выходных воздействий; R – множество возможных корректировок решений о состоянии СЛО посредством отображений ψ и ξ ; η – оператор шкалирования всех входных и выходных переменных; χ – оператор взаимно-однозначного соответствия Y/\mathcal{E} со шкалой выходной переменной Y ; $\vartheta = \eta \circ \chi: Y \rightarrow Y/\mathcal{E}$ – композиция отношений в задаче диагностирования состояния СЛО. Проведем модификацию ранее предложенного описания, введя следующий новый элемент μ – оператор принятия решения экспертом при диагностировании состояния СЛО.

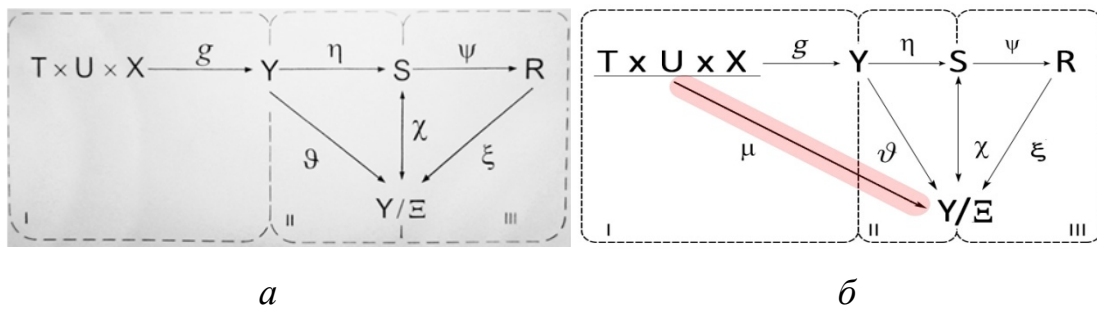


Рисунок 1.5 – Коммутативные диаграммы технологий реализации процессов выработки и принятия решений на основе: *a* - данных и *б* - экспертных знаний (выделено цветом)

Естественно полагать, что в этом случае метазнания $MZ^{\exists}(q,t,\mu)$ эксперта включают профессиональные явные $Z^{\exists}_{\text{пр}}(q,t,\mu)$ и неявные $Z^{\exists}_{\text{н}}(q,t,\mu)$ знания о состоянии конкретного СЛО. В указанной ситуации раскрытие неопределенности состояния СЛО на основе явных и неявных экспертных знаний позволяет конструктивно сформировать отображение μ в виде:

$$\mu: T \times U \times X \rightarrow Y/\mathcal{E}. \quad (1.2)$$

Предложенная коммутативная диаграмма, кроме наглядного описания возможных вариантов реализации процессов выработки и принятия решения о

техническом состоянии СЛО, позволяет применительно к решению диссертационной проблемы учесть еще следующие ее основные аспекты.

Во-первых, её можно считать диаграммой, описывающей концептуальную модель процесса накопления и использования знаний и опыта эксперта, поскольку в ней раскрывается содержание как задач наблюдения в выбранном факторном пространстве, так и задач принятия решений, как показано на рисунке 1.5, что, собственно, и составляет предмет экспертных знаний, формируемых опыт эксперта в процессе его профессиональной деятельности.

Во-вторых, эту же диаграмму можно интерпретировать как комплекс необходимых этапов при построении математической модели оценивания состояния СЛО на основе экспертных знаний. В таком аспекте отображение вида

$$g: T \times U \times X \rightarrow Y$$

задает факторное пространство вместе с представлением эксперта о множестве независимых переменных, определяющих соответствующие значения зависимой переменной Y .

В этом случае задача классификации состояния СЛО определяется отображением

$$\eta: Y \rightarrow S \quad (1.3),$$

которое формируется на основе систематизации экспертом для всего факторного пространства системы шкал S , существующих в его сознании. Затем эксперт, путем разбиения (факторизации) множества Y состояний СЛО на частично пересекающиеся классы состояний определяет фактор-множество Y/\mathcal{E} через отображение

$$\vartheta: Y \rightarrow Y/\mathcal{E}. \quad (1.4)$$

Так, например, отображение (1.4) в общем виде обуславливает в продукционных правилах (п.1.3.2) антецедент «Если...» на множестве выбранных входных переменных $U \times X$ и консеквент «То ...» на фактор-множестве Y/\mathcal{E} в виде оценки эксперта. При этом реализация композиции отношений

$$\vartheta = \eta \circ \chi: Y \rightarrow Y/\mathcal{E} \quad (1.5)$$

обеспечивает формирование множества продукционных правил в лингвистическом виде, с помощью которых производится окончательное оценивание состояние СЛО на шкале множества Y/Ξ .

В случае, когда результаты экспертного оценивания не полностью совпадают с решениями, полученными с использованием формальных моделей, то реализуется следующее отображение

$$\psi: S \rightarrow R, \quad (1.6)$$

которое предусматривает корректировку принятого решения по отношению ξ с учетом выбранного шкалирования S .

Отметим, что задачи контроля этапа I и диагностирования этапа II (рисунок 1.5, б) экспертом решаются практически мгновенно, поскольку шкалы S существуют в его сознании, а композиция отношений

$$g \circ \eta \circ \psi \circ \xi: Y \rightarrow Y/\Xi \quad (1.7)$$

является только иллюстрацией нашего понимания процесса выработки осознанных действий в сознании эксперта. В этом *существенное отличие предлагаемого метода* использования экспертных знаний от традиционного подхода, базирующегося на накоплении и обработке большого количества измеренных данных о состоянии СЛО.

1.5.2 Интерпретация и использование G-моделей для формализации и решения проблемы оценивания СЛО

В предыдущем разделе (1.5.1) предложен визульно-понятийный подход к представлению технологий реализации процессов выработки и принятия решений о состоянии СЛО на основе коммутативных диаграмм (рисунок 1.5) как конструкций более общего порядка. При этом следует отметить, что раскрытие неопределенности состояния СЛО на основе явных и неявных экспертных знаний в виде отображения (1.2) $\mu: T \times U \times X \rightarrow Y/\Xi$ возможно множеством различных методов. Важно только, чтобы применяемые методы правильно учитывали структуры на множестве параметров состояния X (измерительных или вербальных), на основе которых можно строить соответствующие топологические

структуры и топологическое пространство. Особенно важен такой подход в борьбе со сложностью при построении моделей оценивания состояния СЛО на основе явных и неявных экспертных знаний при управлении производственными процессами в условиях неопределенности, когда необходимая потоковая информация обладает нечеткостью или просто отсутствует по объективным причинам [250-252,275]. В таких условиях механизм реализации оценивания состояния СЛО должен быть нацелен не только на выполнение концептуальных требований, предъявляемых к моделям представления знаний (рисунок 1.4), но и идеологически обоснованным (см. Приложение 2).

1.5.2.1 Диаграмма связи вычислительной модели для распознавания состояния СЛО

В фундаментальном труде [168] поставлена и решена проблема потоково-многоуровневого распознавания технического состояния СЛО. Основным методологическим принципом выступает переход от конструкций метрических пространств к конструкциям более общего порядка – топологическим пространствам. Воспользуемся ранее полученными в работе [168] результатами применительно к решаемой в предлагаемой диссертации проблеме оценивания состояния СЛО на основе явных и неявных знаний.

В работе [168] было показано, что в окончательном варианте диаграмма связи для потоково-многоуровневого распознавания принимает вид, представленный на рисунке 1.6. Здесь соответствующие множества вместе со своими топологиями τ составляют топологические пространства.

При этом работе [168] были введены следующие базовые множества и отношения для анализа диаграммы.

$(\Omega, \tau_\omega) = \{\omega\}$ – множество технических состояний, способных проявляться на СЛО.

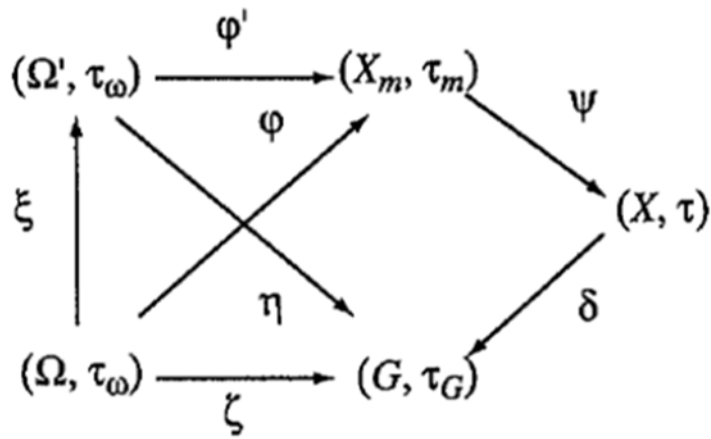


Рисунок 1.6 – Диаграмма связи для потоково-многоуровневого распознавания технического состояния СЛО

$(G, \tau_G) = \{g\}$ – множество решений (управляющих воздействий) соответствующей надсистемы для рассматриваемой системы распознавания – системы управления, функционирующей совместно с СЛО.

Для правильного выбора стратегии синтеза структуры вычислительной модели были определены связи между введенными множествами.

$\varphi: (\Omega, \tau_\omega) \rightarrow (X_m, \tau_m)$ – отношение наблюдения или измерения – отображение, ставящее в соответствие каждому элементу $\omega \in \Omega$ его образ (точку) в измеряемом пространстве (X_m, τ_m) .

$\zeta: (\Omega, \tau_\omega) \rightarrow (G, \tau_G)$ – отношение классификации – целевое отношение при синтезе системы распознавания состояния СЛО.

$\psi: (X_m, \tau_m) \rightarrow (X, \tau)$ – отображение вычислимости или вычисления, которое каждому элементу (точке) измеряемого пространства однозначно сопоставляет элемент (точку) пространства параметров состояния СЛО. Это сопоставление задается посредством вычисления значений недостающих вычисляемых параметров состояний.

$\delta: (X, \tau) \rightarrow (G, \tau_G)$ – отображение интерпретации, которое каждой области в пространстве параметров состояний (X, τ) сопоставляет элемент пространства классов (G, τ_G) .

Тогда задача распознавания состояния СЛО формулируется следующим образом [168]: непосредственным преобразованием измерительной информации по

синтезированной схеме программы, обеспечивающей потоково-многоуровневое получение достоверных результатов в реальном масштабе времени, построить потоковое многоуровневое вычисление значений параметров цели анализа X_g , соответствующее отношению классификации ζ , по отнесению предъявленных для распознавания объектов $\omega \in \Omega$ к одному или нескольким классам $g^{opt} \in G$, которые доставляют максимум в выражение для F_d :

$$g^{opt} = \underset{g \in G}{\text{Argmin}} (F_d(X_g)),$$

где F_d – множество параметрических отображений с множеством значений достоверности (правдоподобия)

$$d_\zeta \in D_s \in [0, 1] \subset R^+$$

вычисленных значений множеству \mathcal{X} параметров цели

$$X_g \in \mathcal{X}_g \subset :F_d: X_g \rightarrow D_s.$$

В рамках данной диссертации далее будет показано как сформулированная выше задача может быть решена с использованием разработанного нечетко-возможностного подхода (см. главу 6).

1.5.2.2 Вычислительная G-модель как обобщение экспертных знаний о СЛО

Еще одним из методов преодоления сложности применительно к построению обобщенных вычислительных моделей состояния СЛО является построение G-моделей [168]. Вычислительная G-модель, с помощью которой может быть задана модель СЛО, представляется кортежем

$$M_G = \langle X, R_M, P_M, \Delta_M \rangle, \quad (1.8)$$

где $X = \{x_i, i = 1, \dots, n\}$ – множество переменных, характеризующих состояние СЛО;

R_M – множество отношений на множестве параметров X ;

P_M – конечное множество предикатов параметров из X ;

Δ_M – отображение $R_M \rightarrow P_M$.

На рисунке 1.7 представлена трехступенчатая операторная схема СЛО в виде G -модели на множестве параметров X и множестве операторов $\Phi_M M_G = \langle X, \Phi_M \rangle$, у которой

$$X = \{x_1^1, \dots, x_6^1, x_1^2, \dots, x_8^2, x_1^3, \dots, x_{11}^3\},$$

$$\Phi_M = \{x_0 = \varphi_0(x_1^1, \dots, x_6^1); x_1^1 = \varphi_1(x_1^2, x_2^2, x_3^2), \dots, x_6^1 = \varphi_6(x_4^2, \dots, x_8^2); x_1^2 = \varphi_7(x_1^3, x_2^3), x_2^2 = \varphi_8(x_3^3, x_4^3); \dots, x_8^2 = \varphi_{15}(x_{11}^3)\}.$$

В данном случае G -модель сформирована для целей мониторинга состояния СЛО. При этом множество операторов задается функциями любого вида, адекватно описывающими соответствующие состояние элементов или подсистем СЛО, а $x_0(t)$ может выступать, например, как качество продукции в момент измерения.

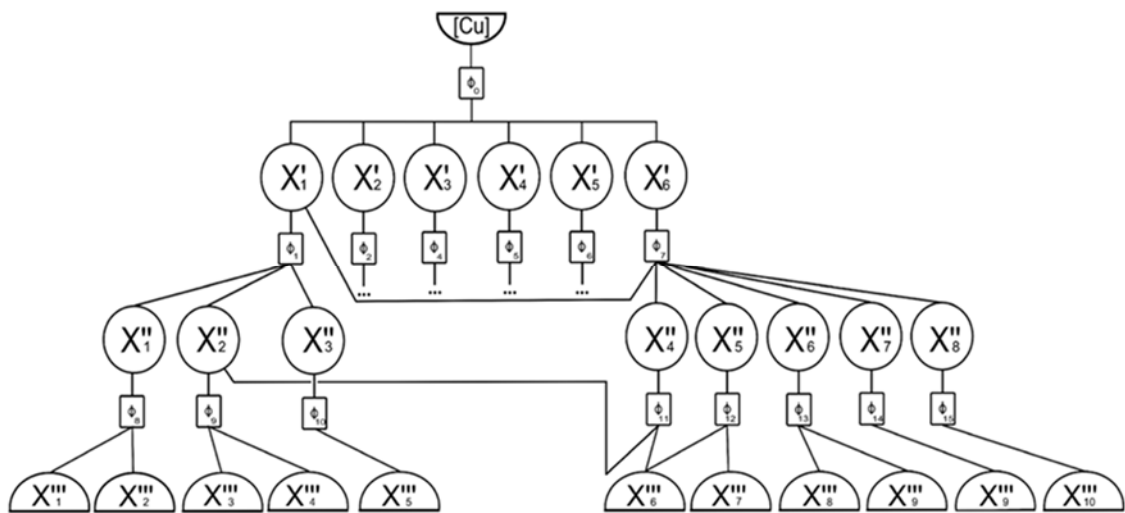


Рисунок 1.7 – Пример G -модели трехступенчатой операторной схемы СЛО (например, металлургическое предприятие)

Предлагаемая интерпретация ранее введенных в работе [168] диаграмм реализации процесса выработки и принятия решения о состоянии СЛО, но уже с учетом использования явных и неявных экспертных знаний об указанном объекте предполагает последовательное решение следующих двух основных задач:

- создание методики оценивания состояния СЛО на основе реализации композиции отношений с разбиением (факторизацией) множества Y состояний на непересекающиеся или частично пересекающиеся классы состояний;

- разработка методики синтеза расчетных моделей конкретного состояния СЛО.

Такая общая постановка проблемы управления сложностью применительно к оцениванию состояния СЛО справедлива для любого вида представления информации как в метрических пространствах, так и в виде экспертных знаний. В связи с этим формализация экспертных знаний в виде моделей для последующей компьютерной обработки представляется актуальной в смысле приведенного выше закона Эшби.

1.5.3 Формализация проблемы оценивания состояния СЛО на основе явных и неявных экспертных знаний

1.5.3.1 Оценивание состояния СЛО на основе явных и неявных экспертных знаний

Модели, представляющие экспертные знания в конкретном производственном объекте, являются интеллектуальными по своей сути, поскольку напрямую отражают опыт и интуицию эксперта. Эксперт способен измерять и «неизмеряемое» [224], то есть работать в «виртуальном пространстве». Примером могут служить учитываемые экспертом неколичественные переменные, определяемые органолептически [27] (например, «характерное изменение звука»), при выработке управляющего воздействия, или при построении моделей прогнозирования состояния объекта на его предпроектной стадии, когда самого объекта еще не существует. В таких ситуациях эксперт выступает в роли «интеллектуальной измерительно-диагностической системы» по оцениванию состояния исследуемых объектов, процессов и явлений в многомерных пространствах нечетких переменных [239]. С другой стороны, в случае, например, управления технологическим процессом оператор-технолог выступает и в качестве «измерительной системы» при оценке, сложившейся на данный момент времени ситуации, и в качестве лица, принимающего решение, при выработке и реализации

соответствующих управляющих воздействий. Анализ многочисленных исследований, описанных в научно-технической литературе, показал, что существует острая проблема: с одной стороны, есть эксперты как носители огромного количества уникальных знаний, которые, к сожалению, уходят вместе с экспертами, а с другой – слабо разработанный научно-методический аппарат, позволяющий *извлекать, представлять, сохранять и тиражировать* знания экспертов о состоянии СЛО для их последующего использования при управлении и принятии решений в указанных объектах.

Принципиальной особенностью процесса извлечения и формирования новых знаний о состоянии СЛО является *замещение экспертных знаний соответствующей моделью* с последующим ее использованием для решения широкого спектра практических задач [140]. Применительно к модели, построенной на экспертных знаниях, правомерно утверждать, что такая модель является отражением явных и неявных знаний данного эксперта (группы экспертов). Поскольку знания в мозгу человека хранятся, согласно последним гипотезам психологов [12,183], в вербальном, а не в количественном виде. Степень же и форма структурированности их зависит, на наш взгляд, от интеллектуальных способностей индивидуума.

Попутно отметим:

- структуризация знаний невозможна без некоторых порядковых шкал, и именно поэтому для специалистов в различных областях науки и техники необходима разработка специальных шкал по различным конкретным вопросам, которые позволят получать сравнимые оценки, а каждый результат исследования по конкретному вопросу рассматривать как частный случай единого эксперимента с возможностью его широкого обобщения;

- пространства переменных функционирования СЛО или работы оператора-технолога при управлении технологическими процессами в подавляющем большинстве существенно отличаются от тех, для описания которых возможно использование традиционных математических методов [223,259]. Так, если взять, к примеру, металлургическую промышленность, то практически все

технологические процессы ведутся операторами-технологами исключительно на основе своего интуитивного опыта и знаний в очень ограниченном факторном пространстве, тогда как характеристики насчитывают сотни, а то и тысячи, измеряемых параметров. Иными словами, оператор вырабатывает управляющее воздействие на основе модели оценивания состояния СЛО, сложившейся в его сознании (подсознании) на основе опыта и интуиции, а также наработанных альтернативных вариантов оценивания и прогнозирования состояния СЛО.

Рассмотрим теоретические аспекты деятельности эксперта как «интеллектуальной информационно-измерительной системы» при выработке вариантов решения о состоянии СЛО.

В работе [269] была доказана теорема об универсальном представлении структур, в том числе и реляционных, в виде упорядоченного мажорированного множества.

Теорема: для любой реляционной системы

$$S = (X; R), X = \{x, t, t \in T\}, R = \{Rr(i) \subseteq Xr(i), i \in I\}, \quad (1.9)$$

существует упорядоченное множество

$$s_{\Sigma} = (\Omega, R_{\Sigma}), R_{\Sigma} = \{R_{\Sigma}^{r(i)} \subseteq \Omega^2, i \in I\},$$

такое, что система S изоморфна некоторой подсистеме

$$S' = (X', R_{\rightarrow}), X' = \{x', t \in T\} \subseteq B(\Omega)$$

системы цепного мажорирования $S_{\rightarrow}(s_{\Sigma})$ над s_{Σ} .

Здесь $S(X; R)$ – обобщенная измерительная шкала со структурой R для числового измерения любого признака x на множестве X , обладающего мощностью континуума, то есть действительная прямая. Тогда, если рассматривать экспертные знания, явные и неявные, как реляционные структуры (здесь реляции – высказывания), то их можно конструктивно задать в конечных линейных ординальных шкалах. Этот фундаментальный вывод дополняется экспериментально установленным фактом ориентации исследователей и экспертов именно на такой тип шкал [6,7,60,61,121-124].

Реализация процедуры перехода от линейной ординальной шкалы к числовой, называемая «арифметизацией» (п. 1.3.1), обеспечивает трансформацию *нечисловых* экспертных знаний в обыкновенные *числовые исходные данные*. Такой прием используется, например, при представлении высказываний эксперта в виде продукционных правил [97]. Далее эту числовую информацию уже возможно подвергать обработке статистическими методами с получением средних, дисперсий, регрессионных коэффициентов и т. д. Иными словами, в работе [269] теоретически показана *возможность формализации экспертных знаний* некоторыми аналитическими выражениями.

Таким образом, в условиях существенной неопределенности решение проблемы формализации экспертных знаний видится во всестороннем обеспечении эксперта специально разработанными методиками, позволяющими свести процесс оценивания состояния СЛО к формальным процедурам, оставляя эксперту проведение профессиональной интерпретации результатов, полученных с использованием соответствующих агрегированных моделей, сформированных на основе их явных и неявных знаний.

Базируясь на результатах, полученных в работах [99-102,114-116,122,157], процессы получения и обработки интеллектуальных измерений применительно к экспертным оценкам, используемым при оценивании состояния СЛО можно представить следующей обобщенной формулой [99-102,114-116,122,157]:

$$h(x_i) \in \{MX_{x_i}\} = \underset{x_i; \varphi_j}{\text{Argmin}} C_{x_i} [\varphi_{j_{x_i}}(x_i | Z_{x_i})], \quad (1.10)$$

где

x_i – измеряемое свойство из множества свойств объекта исследования;

h_{x_i} – количественное значение измеренного свойства;

MX_{x_i} – множество метрологических характеристик, определяющих точность, достоверность и надежность получаемой информации по измерению свойства x_i ;

Argmin – функция принятия решения по правилам C в лингвистической форме (оптимизация) на множестве текущих значений экспериментально

измеряемого свойства x_i по алгоритмам принятия лингвистического решения φ_{jx_i} из множества алгоритмов Φ_j (j – количество алгоритмов);

Z_{x_i} – множество условий, необходимых для выполнения измерений свойства x_i и принятия решения о результатах произведенного измерения относительно hx_i .

Так, например, лингвистический вывод эксперта о текущем значении hx_i измеренного свойства x_i по (1.10) можно считать «реляцией» в интерпретации [253] на уровне получаемых измерительных данных.

При данном подходе понятие «знания» подразумевает не только сами экспертные оценки, а включает в себя, как минимум: системные знания предметной области СЛО; метрологические знания о качестве информации, характеризующей объект измерения; знания о свойствах средств измерений, применяемых в данной предметной области; алгоритмические знания и метазнания по вопросам моделирования как самих объектов, так и организации систем интеллектуальных измерений.

При извлечении знаний эксперта по какому-либо конкретному вопросу в числе многих обязательно присутствуют и знания из сопредельных областей, которые находятся в его сознании в некоторой интуитивной форме, вступают в какие-то взаимодействия друг с другом и приводят к формированию управляющего решения в его сознании. Накопленные же понятийные знания из других областей расширяют не столько «базу данных», которыми может оперировать эксперт, сколько «базу знаний», формирующих его опыт.

Познания эксперта, как следует из анализа уравнения (1.10), должны быть всеобъемлющими, разносторонними и глубокими. Очевидно, однако, и другое – в реальности эксперт обладает глубокими знаниями только в своей профессиональной области, а по специфичным вопросам он владеет только понятиями и вынужден обращаться к специалистам соответствующих областей. Так, например, для создания модели, описывающей параметры состояния СЛО с использованием экспертной информации, эксперт должен обратиться к *инженеру по знаниям* [59-61], который может ознакомить эксперта с концепцией и методикой построения модели, а также помочь в реализации соответствующей методики

оценивания состояния СЛО применительно к конкретной задаче. При этом здесь неявно подразумевается, что такая методика уже существует и инженер по знаниям имеет опыт ее использования.

Вместе с тем, существующая практика и специфика применения системного анализа предусматривает применение таких математических методов, которые эксперту даже в технических областях не всегда под силу [271,272]. Поэтому актуальной для извлечения экспертным знаниям о состоянии СЛО является разработка технологий, удовлетворяющих следующим требованиям. Они должны позволять общаться с экспертом на привычном для него профессиональном языке, побуждают его мыслить системно, обладают возможностью формализовать полученную информацию, предпочтительно в виде аналитического выражения.

Наличие *теоретической возможности* получения аналитического выражения для описания состояния СЛО выступает, таким образом, доказательством возможности использования эксперта как интеллектуальной информационно-измерительной системы.

1.5.3.2 Теоретико-множественная постановка проблемы оценивания состояния СЛО на основе явных и неявных экспертных знаний

В диссертационном исследовании, как следует из вышеизложенного, процесс перевода экспертных знаний в удобный для последующей компьютерной обработки вид должен состоять из трех последовательных этапов: ***извлечения знаний, представления знаний и формализации знаний***. Все перечисленные этапы обработки экспертных знаний изображены на коммутативной диаграмме, представленной на рисунке 1.8.

На рисунке 1.8 приняты следующие обозначения:

$g_1: MZ^{\exists}(q, t, \mu) \rightarrow Z^{\exists}_k(q, t, \mu)$ – отображение, задающее процесс *извлечения* множества характеристик (параметров) состояния конкретного СЛО $Z^{\exists}_k(q, t, \mu)$ из метазнаний $MZ^{\exists}(q, t, \mu)$ эксперта, включающих профессиональные явные $Z^{\exists}_{np}(q, t, \mu)$ и неявные $Z^{\exists}_n(q, t, \mu)$ знания, а также знания в сопредельных областях $Z^{\exists}_{conp}(q, t, \mu)$;

$g_2: Z^{\exists}_{\kappa}(q, t, \mu) \rightarrow Z^{\exists}_{\phi n}(q, t, \mu)$ – отображение, задающее процесс *представления характеристик* $Z^{\exists}_{\kappa}(q, t, \mu)$ в виде лингвистических переменных и формирование факторного пространства $Z^{\exists}_{\phi n}(q, t, \mu)$, в котором эксперт принимает решение о состоянии СЛО для конкретной задачи;

$g_3: Z^{\exists}_{\phi n}(q, t) \rightarrow Y/\Xi$ – отображение, задающее процесс *формализации* явных и неявных экспертных знаний (как наилучшим образом построить модель, удовлетворяющую требованиям к моделям представления знаний [168]) ;

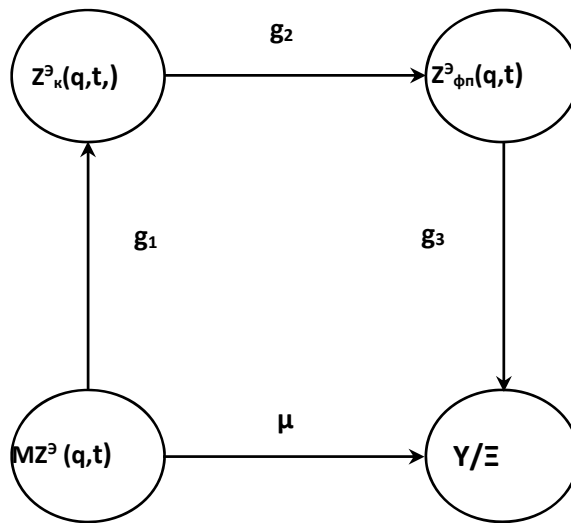


Рисунок 1.8 – Коммутативная схема процессов извлечения, представления и формализации явных и неявных экспертных метазнаний

Y/Ξ – классы состояния СЛО, к одному из которых следует отнести результат оценивания состояния СЛО;

$MZ^{\exists}(q, t, \mu)$ – метазнания эксперта;

$Z^{\exists}_{\kappa}(q, t, \mu)$ – множество всех возможных переменных применительно к решению конкретной задачи;

$Z^{\exists}_{\phi n}(q, t, \mu)$ – множество количественных и нечисловых переменных, образующих факторное пространство как подмножество множества $Z^{\exists}_{\kappa}(q, t, \mu)$, на основе которых принимается решения о состоянии СЛО;

$\mu = g_3 \circ g_2 \circ g_1$ – композиция отображений, задающих процессы извлечения, представления и формализации экспертных знаний на выбранном факторном множестве Y/Ξ .

Таким образом, ранее введенное отображение μ в виде (1.2) $\mu: T \times U \times X \rightarrow Y/\mathcal{E}$, может быть представлено в виде композиции перечисленных отображений

$$\mu = g_3 \circ g_2 \circ g_1. \quad (1.11)$$

Проведем дальнейшую детализацию процесса формирования отображения вида (1.11). Поскольку работа инженера по знаниям ведется с экспертом, вернее с его метазнаниями $MZ^{\mathcal{E}}(q, t, \mu)$, то метазнания целесообразно представить в виде следующего теоретико-множественного описания:

$$MZ^{\mathcal{E}}(q, t, \mu) = \{ \langle Z^{\mathcal{E}}_{np}(q, t, \mu), Z^{\mathcal{E}}_{comp}(q, t, \mu), Z^{\mathcal{E}}_n(q, t, \mu), \\ Q^{\mathcal{E}}, \{Z^{\mathcal{E}}_{\kappa}(q, t, \mu), Z^{\mathcal{E}}_{fn}(q, t, \mu), Y/\mathcal{E}\} \rangle, \}$$

где

$Z^{\mathcal{E}}_{np}(q, t, \mu)$ – множество профессиональных знаний, связанных с рассматриваемой проблемой;

$Z^{\mathcal{E}}_{comp}(q, t, \mu)$ – множество знаний в сопредельных областях,

$Z^{\mathcal{E}}_n(q, t, \mu)$ – множество неявных знаний, опыт, интуиция;

$Q^{\mathcal{E}} = \{q\}$ – множество, элементы которого, характеризуют общую квалификацию эксперта;

$t \in T$ – множество моментов времени;

$Z^{\mathcal{E}}_{\kappa}(q, t, \mu)$ – множество всех возможных переменных, используемых при решении конкретных прикладных задач;

$Z^{\mathcal{E}}_{fn}(q, t, \mu)$ – множество количественных и не количественных переменных (подмножество множества $Z^{\mathcal{E}}_{\kappa}(q, t, \mu)$, образующих факторное пространство, в котором принимает решения о состоянии СЛО на выбранном фактор-множестве Y/\mathcal{E} (представление экспертных знаний).

Как следует из анализа рисунка 1.8, отображение вида

$$\mu: MZ^{\mathcal{E}}(q, t, \mu) \rightarrow Y/\mathcal{E}$$

в обобщенном виде описывает работу эксперта при решении проблемы оценивания состояния СЛО на основании своего опыта и знаний (явных и неявных).

На коммутативной диаграмме (рисунок 1.5б) технология реализации процесса выработки и принятия решений на основе экспертных знаний μ была введена декларативно. Здесь же она представлена композицией отношений $\mu =$

$g_3 \circ g_2 \circ g_1$ и описывает поэтапную работу инженера по знаниям при обработке и формализации множества высказываний эксперта для оценивания состояния СЛО.

Таким образом, обобщенная структура и содержание решаемых в диссертации задач, связанных с разработкой моделей и методов извлечения, представления, формализации и структуризации явных и неявных экспертных знаний для оценивания состояния СЛО на концептуальном уровне их описания может быть представлена в следующем виде:

$$\langle X, \Phi_Z, E_{Zпр}, F_Z, M_Z, MZ^{\exists}(q, t, \mu), Z^{\exists}_{пр}(q, t, \mu); \\ Z^{\exists}_H(q, t, \mu); Z^{\exists}_{сопр}(q, t, \mu); K; Y/E \rangle, \quad (1.12)$$

где X – множество состояний СЛО, которые в ходе распознавания должны быть отнесены к одному из определенных классов Y/E ;

Φ_Z – множество методов извлечения знаний;

$E_{zпр}$ – множество методов представления знаний;

F_Z – множество методов и алгоритмов формализации знаний;

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

$MZ^{\exists}(q, t, \mu)$ – множество метазнаний, общая эрудиция, явные и неявные экспертные знания, умение ориентироваться в сложной обстановке;

$Z^{\exists}_{пр}(q, t, \mu)$ – множество профессиональных знаний, состоящих в умении эксперта разобраться в проблеме, провести постановку задачи, неявные знания, навыки, опыт, интуиция.

$Z^{\exists}_{сопр}(q, t, \mu)$ – множество знаний в сопредельных предметных областях применительно к профессии;

Y – вычисленная обобщенная оценка состояния СЛО, позволяющая отнести его к одному из выбранных классов состояний;

K – множество критериев оценивания качества моделей;

Y/E – множество классов состояния СЛО, к одному из которых следует отнести результат его оценивания.

Рассмотрим подробнее приведенные выше множества, наиболее часто применяемые в процессе работы инженера по знаниям с экспертом при решении конкретной задачи методом интервью.

X – множество возможных состояний СЛО, элементы которого в ходе распознавания должны быть отнесены к одному из множества классов Y/\mathcal{E} . При этом мощность множества состояний, как правило, больше мощности конечного множества классов указанных состояний.

Φ_z – множество методов *извлечения* знаний. Наиболее часто используемыми методами *извлечения* знаний являются методы собеседования с экспертом, интервью, анкетирование, групповые методы, например, Дельфи и др. (таблица 1.1). При выборе метода извлечения знаний главным является четкая постановка задачи, в ходе решения которой должен быть получен однозначный ответ на вопрос «*что спрашивать*».

E_z *пр* – множество методов *представления* знаний. При этом главным для инженера по знаниям является поиск однозначного ответа на вопрос «*как спрашивать*». Применительно к представлению знаний эксперта наиболее предпочтительными моделями и методом являются модели и методы, базирующиеся на лингвистических описаниях знаний, которые дают возможность их представлять как количественной, так и качественных формах.

F_z – множество методов и алгоритмов *формализации* знаний. На этом этапе работы инженера по знаниям ищется ответ на вопрос «*как формализовать полученную экспертную информацию в виде, удобном для компьютерной обработки и дальнейшего использования*». На практике обычно применяют методы свертки информации (аддитивная, мультипликативная), статистико-вероятностные методы, логико-алгебраические и логико-лингвистические методы формализации знаний и их комбинации

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

$MZ^{\exists}(q, t, \mu)$ – метазнания, включающие в себя - общую эрудицию, явные и неявные знания эксперта, его умение ориентироваться в сложной обстановке,

профессиональные знания, знания в сопредельных областях и многое другое, входящее в понятие «интеллект». При этом психологами установлено, что эксперт всегда знает больше, чем может выразить словами, и даже приходят к мысли, что «эксперт не знает, что и сколько он знает» [59,138]. Это намек на то, что инженеру по знаниям нужно овладевать приемами, позволяющими «правильно спрашивать» эксперта: что спрашивать (извлечение знаний), как спрашивать (представление знаний) и как формализовать полученные знания.

$Z_{np}^{\partial}(q, t, \mu)$ – профессиональные знания, умение разобраться в проблеме, постановка задачи, неявные знания, навыки, опыт, интуиция. Инженер по знаниям должен тщательно готовиться к разговору с экспертом, чтобы вести интервью с прицелом на решение конкретно поставленной задачи.

$Z_{comp}^{\partial}(q, t, \mu)$ – знания в сопредельных областях применительно к профессии. Как правило, высококвалифицированный специалист, выступающий в роли эксперта, достаточно эрудирован в многих аспектах, конкретно не принадлежащих к его профессии, как носитель метазнаний. Это могут быть: множество типов решаемых задач, интерпретация данных, диагностика, мониторинг, проектирование, прогнозирование, планированное обучение, управление, поддержка принятия решения и т.д.

$\{q\}$ – аспекты квалификации эксперта, эрудиция, умение отстаивать свои убеждения, навыки при решении конкретных задач по состоянию СЛО в заданный момент времени t . Здесь подразумевается способность эксперта повышать квалификацию во времени как неотъемлемое свойство специалиста в своей области.

Как следует из анализа обобщенного выражения (1.12), эксперт в общем случае должен обладать энциклопедическими междисциплинарными знаниями. Такие требования непосильны для одного человека, а потому в качестве помощника для решения конкретных задач о состоянии СЛО в любой заданный момент времени должен выступать инженер по знаниям [59], способный задавать эксперту такие и столько вопросов, чтобы сформировать у него устойчивое

представление о методике и самом построении модели изучаемого явления (в нашем случае комплекса моделей для оценивания состояния СЛО).

1.5.3.3 Концепция и технология создания научных основ формализации и обработки экспертных знаний

Использование экспертных знаний достаточно широко распространено при построении моделей различного вида и назначения. При этом практически каждое моделирование начинается с построения обобщенных моделей, возникающих в сознании человека и называемых концептуальными структурами, которые затем переходят в концептуальные (словесно-описательные) и далее в теоретико-множественные и структурно-математические описания [192]. На рис. 1.9. представлен пример такого обобщенного описания применительно к основным этапам проведения имитационного моделирования СЛО.

Изображенная на рисунке 1.9 последовательность этапов выполнения имитационного моделирования имеет такую степень детализации, которая позволяет ее сравнить с последовательностью этапов выполнения нечетко-возможностного моделирования, предлагаемого в диссертации для решения проблемы оценивания состояния СЛО.

Из анализа данного рисунка следует, что ключевыми этапами проведения имитационного моделирования являются этапы, связанные с их планированием, а также построением полиномов, аппроксимирующих многомерную поверхность откликов разработанной имитационной модели функционирования СЛО и позволяющих уже в аналитическом виде связать множества входных и выходных воздействий указанного объекта. Далее, имея данные полиномиальные зависимости, можно уже на конструктивном уровне решать задачи оценивания и многовариантного прогнозирования состояния СЛО.

Основная идея предлагаемого в диссертации нечетко-возможностного подхода к описанию и оцениванию состояния СЛО состоит в том, чтобы попытаться построить аналогичные полиномиальные зависимости и соответствующую аппроксимационную многомерную поверхность откликов,

которые описывают в обобщенном виде имеющиеся причинно-следственные связи, определяющие основные особенности функционирования СЛО, но задаваемые не в дискретно-событийной форме, как это делается в классических имитационных моделях, а уже нечетко-продукционной форме, фиксирующей явные и неявные знания экспертов о рассматриваемом объекте и вариантах его поведения.

Структурно – логическая схема результатов исследований

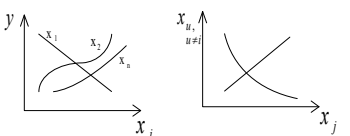
Существующий имитационно-стохастический подход	Данные для построения математических моделей	Подготовка данных для планированного эксперимента	Задание матрицы плана
		<p>Экспериментальные данные</p>  <p>$X_{ij} \in [X_{ij}^{\min}, X_{ij}^{\max}]$, - независимые переменные $j = \overline{1, n}$ - количество 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 $X_{ij} \in \{X_j^{\min}, X_j^{\max}\}$ $x_{ij} = \frac{X_j - X_j^{(0)}}{H_j} \in \{-1, +1\}$ - значение кодированной переменной в матрице планирования экспериментов</p>
Существующий имитационно-стохастический подход	Построение функции отклика	Расчетная модель выходных переменных	Интерпретация результатов
	<p>$\sum_{i=1}^N (y_i^{(k)} - \hat{f}_i(\vec{x}, \vec{b}_r^{(k)}))^2 \rightarrow \min$ $\vec{b}_r^{(k)} \in B^r \subset R$</p> <p>$\hat{f}_i(\vec{x}, \vec{b}_r^{(k)})$ - расчетное значение выходной переменной по уравнению со значимыми коэффициентами</p> <p>$b_r^{(k)} = \frac{\sum_{i=1}^N X_{ir} y_i^{(k)}}{N}$, $r = \overline{0, m}$ - количество коэффициентов аппроксимирующего полинома</p>	<p>$y^{(k)} = b_0^{(k)} + \sum_{j=1}^n b_j^{(k)} x_j + \sum_{j < s < n} b_{js}^{(k)} x_j x_s + \dots + b_{12\dots n}^{(k)} x_1 x_2 \dots x_n$</p> <p>по расчетной матрице $X = \begin{pmatrix} X_{11} & \dots & X_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{N1} & \dots & X_{Nn} \end{pmatrix}_{N \times m}$, $m = n + r$, r - количество нелинейных коэффициентов $r = \overline{1, m}$</p> <p>$t = \frac{b_r}{s_{b_r}}$, где $s_{b_r} = \frac{s_{b_r}}{s_{b_r}}$ - ошибка определения коэффициентов. Значимость коэффициентов – по t-критерию Стьюдента.</p>	<p>$\vec{y} = \vec{f}(\vec{x}, \vec{b}_0, \vec{b}_1, \dots, \vec{b}_n, \vec{b}_{12}, \dots)$</p> <p>$\vec{X} = (X_1, X_2, \dots, X_r)$ $r = \overline{1, m}$</p> <p>Коэффициенты, отражающие специфику вещественные переменные, задающие факторное пространство функционирования объекта математической формализации исследуемого объекта</p> <p>Процедурный путь использования данных – экстенционал (по Д. Поспелову)</p>

Рисунок 1.9 – Структурно-логическая схема выполнения имитационного моделирования СЛО при оценивании его состояния

Данная идея в наглядном виде проиллюстрирована на рис. 1.10, где представлена в обобщенном виде структурно-логическая схема разрабатываемого нечетко-возможностного подхода для построения и использования

соответствующей модели оценивания состояния СЛО. Анализ данного рисунка показывает, что для того, чтобы повторить основные этапы имитационного моделирования СЛО, но уже для ситуаций, когда вместо количественных описаний переменных и ограничений имеются их описания на качественном уровне, требуется разработка **принципиально нового научно-методического обеспечения.**

В предлагаемой диссертации проводится обоснование и разработка методологических и методических основ решения проблемы оценивания состояния СЛО с использованием явных и неявных экспертных знаний.

Структурно – логическая схема результатов исследований (продолжение)

	Данные для построения математических моделей	Подготовка данных для планированного эксперимента	Задание матрицы плана
Предлагаемый нечетко-возможностный подход к построению ЛПМ	<p>Представление экспертных знаний в виде лингвистических переменных (ЛП)</p> <p>входные переменные \tilde{X}_j :</p> <p>Количественные ЛП</p> <p>Качественные ЛП</p> <p>выходные переменные $\tilde{Y}^{(k)}$:</p> <p>Шкала лингвистических значений: Н – низкое, С – среднее, В – высокое</p>	<p>Подготовка ЛП для построения опросной матрицы</p> <p>Кодирование</p> $\tilde{X}_{ij}^{(0)} = \frac{\tilde{X}_{ij}^{\min} \oplus \tilde{X}_{ij}^{\max}}{2}$ <p>основной уровень</p> $\tilde{H}_j = \frac{\tilde{X}_j^{\max} \ominus \tilde{X}_j^{\min}}{2}$ <p>интервал варьирования</p> $\tilde{X}_{ij} \in \{ \tilde{X}_j^{\min}, \tilde{X}_j^{\max} \}$ $\tilde{X}_{ij} = \frac{\tilde{X}_{ij} \ominus \tilde{X}_{ij}^{(0)}}{\tilde{H}_j}; \tilde{X}_{ij} \in \{-1, 1\}$	<p>Задание матрицы плана</p> <p>Матрица опроса эксперта в пространстве нечетких ЛП</p> $U_j^k = \ \tilde{x}_{ij}^k\ $ <p>для которой необходимо выполнение условий ортогональности</p> $\sum_{i=1}^N \tilde{x}_{ij} = 0;$ $\sum_{i=1}^N \tilde{x}_{im} \otimes \tilde{x}_{is} = 0, \quad u, s = \overline{1, l}, u \neq s$ $\sum_{i=1}^N \tilde{x}_{ij}^2 = N$
Концептуальные и математические основы предлагаемого подхода	<p>Потребовалось:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Ввести новую стандартизированную форму представления нечеткого числа (LR)-типа. 2. Ввести расширенные арифметические операции над нечеткими числами (LR)-типа, нечувствительные к знаку. 3. Обобщить дополнительные арифметические операции для сохранения исходного уровня нечеткости и точного решения нечетких уравнений. 	<p>Использованы:</p> <ul style="list-style-type: none"> - дополнительные арифметические операции для получения четких границ на концах интервала задания лингвистических переменных; - полученные формулы для оценки нечеткого расстояния; - введенная нечеткая метрика на множестве нечетких чисел (LR)-типа; - нечеткие лингвистические шкалы в n-мерном метрическом пространстве. 	<p>Использованы:</p> <ul style="list-style-type: none"> - дополнительные арифметические операции для сохранения первоначальной нечеткости зависимой переменной; - ортогональность и ротатабельность матрицы планированного эксперимента нечетких высказываний Эксперта в виде ЛП.
	<p>Построение функции отклика</p>	<p>Расчетная модель выходных переменных</p>	<p>Интерпретация результатов</p>
Предлагаемый нечетко-лингвистический подход	$\sum_{i=1}^N (\tilde{y}_i^{(k)} - \tilde{f}_i^{(k)})^2 \rightarrow \min$ <p>$\tilde{y}_i^{(k)}$ – расчетное значение нечеткой выходной переменной со значимыми коэффициентами аппроксимирующего полинома</p> $\tilde{b}_r = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ir} \otimes \tilde{f}_i^{(k)}}{N},$ <p>$r = \overline{1, m}$ – количество коэффициентов аппроксимирующего полинома</p>	$\tilde{y}^{(k)} = \tilde{b}_0 + \sum_{i=1}^m \tilde{b}_i^{(k)} \tilde{x}_i + \sum_{j=2}^m \tilde{b}_j^{(k)} \tilde{x}_j \tilde{x}_1 + \dots + \tilde{b}^{(k)} \tilde{x}_1 \tilde{x}_2 \dots \tilde{x}_m$ $\tilde{X} = \ \tilde{x}_{ij}\ _{N \times m}$ <p>Построение модели на основе использования сформированных критериев значимости и количества членов разложения полинома, аппроксимирующего неявные знания Эксперта об изучаемом объекте.</p>	$\tilde{x} = (\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_r), r = \overline{1, m}$ <p>Нечеткие переменные, задающие факторное пространство функционирования объекта на основе экспертных знаний. Коэффициенты отражают опыт и знания эксперта</p> <p>Декларативный путь использования знаний – интенционал (по Д. Поспелову)</p>
Предлагаемый нечетко-возможностный подход к построению ЛПМ	<ol style="list-style-type: none"> 1. Решение нечетких уравнений в пространстве дополнительных арифметических операций. 2. Развитие понятия нечеткого метрического n-мерного пространства. 3. Доказательство возможности применения МНК для построения нечетких моделей с дополнительными арифметическими операциями над НЧ (LR)-типа. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Создание алгоритма вычисления нечетких функций от лингвистических переменных. 2. Разработка алгоритма аппроксимации неявных экспертных знаний аналитической функцией в многомерном пространстве нечетких переменных. 3. Разработка критериев значимости и достоверности нечеткой модели. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Определение степени адекватности модели с использованием мер возможности и необходимости. 2. Введение меры «полезности» модели: $0.5d(A_{\tilde{y}}) < \sum_{r=1}^m b_r^{(k)}$ <p>m – количество значимых коэффициентов аппроксимирующего полинома,</p> <p>$d(A_{\tilde{y}})$ – коэффициент нечеткости выходной переменной.</p>

Рисунок 1.10 – Структурно-логическая схема реализации нечетко-возможностного подхода к решению проблемы оценивания состояния СЛО

При этом наличие разнородных по своей физической природе данных о состоянии СЛО приводит к необходимости создания комбинированных методов обработки и анализа качественной и количественной информации, связанной с функционированием рассматриваемого объекта [27,36,97].

Проведенные исследования также показали, что в качестве основного подхода к извлечению и представлению знаний эксперта целесообразно использовать подход, базирующийся на продукционных правилах [97,178,181].

При этом, если подойти к извлечению экспертных знаний с позиций теории планирования экспериментов, то этом случае строкам матрицы опроса экспертов (которая при имитационном моделировании является матрицей планирования экспериментов) будут соответствовать продукционные правила, описывающих поведение СЛО в многомерном пространстве лингвистических переменных [27,97,224].

Свойство ортогональности расположения точек опроса экспертов в вершинах гиперкуба как одно из важнейших свойств теории планирования экспериментов при такой ее интерпретации позволяет считать высказывания экспертов о закономерностях функционирования СЛО независимыми.

Таким образом в рассматриваемой диссертации предлагается *новый подход к системе извлечения и обработки экспертных знаний при моделировании состояния СЛО в многомерном пространстве лингвистических переменных, базирующийся на комбинированном использовании методов теории планирования экспериментов и инженерии знаний.*

Однако, для корректного использования методов теории планирования экспериментов при решении проблемы оценивания состояния СЛО с использованием явных и неявных знаний экспертов о рассматриваемой предметной области необходимо принять следующие исходные предположения [76,223,224,239]:

- профессиональные знания эксперта о состоянии СЛО задаются нечеткими продукционными правилами, составленными из нечетких лингвистических переменных (п.1.2.2);

- адекватность представления экспертных знаний обуславливается соответствующими шкалами для перехода от вербальных оценок к числовым как обычный процесс арифметизации (п.1.3.1);

- основу построения лингвистических переменных, используемых для описания экспертных знаний составляют оппозиционные шкалы, а промежуточные значения позволяют производить детализацию вербальных оценок эксперта (п.1.3.1);

- эксперт, по мнению психологов, думает словами и не всегда способен количественно оценить степень коррелированности переменных, поэтому устранение явления мультиколлинеарности между переменными, включенными в факторное пространство, осуществляется за счет формирования ортогональных опросных матриц.

Факторное пространство, в котором можно конструктивно описать функционирование СЛО, целесообразно представлять лингвистическими переменными, что хорошо коррелирует с накопленным экспертным опытом, поэтому в аппарате представления знаний эксперта логично использовать элементы теории нечетких множеств, например, в виде нечетких чисел и лингвистических переменных (п.1.3).

На рисунке 1.11 в обобщенном виде представлены основные **направления выполненных** диссертационных исследований, связанных с решением следующих четырех классов задач:

Задачи класса А –Разработка методики извлечения экспертных знаний по состоянию конкретного СЛО с учетом особенностей его эксплуатации, предполагающая решение следующих частных задач:

- разработка методики извлечения профессиональных знаний в виде нечеткой экспертной информации;

- определение показателей факторного пространства принятия решений о состоянии СЛО;

- создание и обоснование вербально-числовых шкал для моделирования изменений состояний СЛО.

Задачи класса Б – Разработка методов представления экспертных знаний, предполагающая решение следующих частных задач:

разработка новых форм задания нечетких чисел (LR)-типа; разработка дополнительных арифметических операций над массивами нечетких чисел (LR)-типа;

применение (LR)-аппроксимации для построения алгоритмов нечеткого вывода в пространствах лингвистических переменных;

представление экспертных знаний при оценивании состояния СЛО нечеткими продукционными правилами, составленными из лингвистических переменных;

определение нечеткой метрики в многомерных нечетких пространствах нечетких чисел (LR)-типа.

Задачи класса В – Разработка метода формализации экспертных знаний в виде аналитических моделей, предполагающая решение следующих частных задач:

построение оптимальных планов опроса эксперта в виде опросных матриц на основе методов теории планирования экспериментов;

разработка критериев оценивания степени адекватности модели знаниям и опыту эксперта;

разработка методики определения количества членов разложения полинома для получения гарантированной точности в условиях неопределенности;

разработка критериев проверки степени адекватности и полезности модели действительному состоянию СЛО.

Задачи класса Г – Разработка методического обеспечения оценивания качества разработанного модельно-алгоритмического аппарата, предполагающая решение следующих частных задач:

разработка методик построения однопараметрических и многопараметрических экспертных моделей состояния СЛО в динамических условиях;

манипулирование нечетко-продукционными моделями при оценивании состояния СЛО;

применение метода расширения размерности факторного пространства при оценивании состояния СЛО;

использование прогнозных экспертных моделей как базы знаний при построении интеллектуальных автоматизированных систем управления технологическими процессами условиях неопределенности.

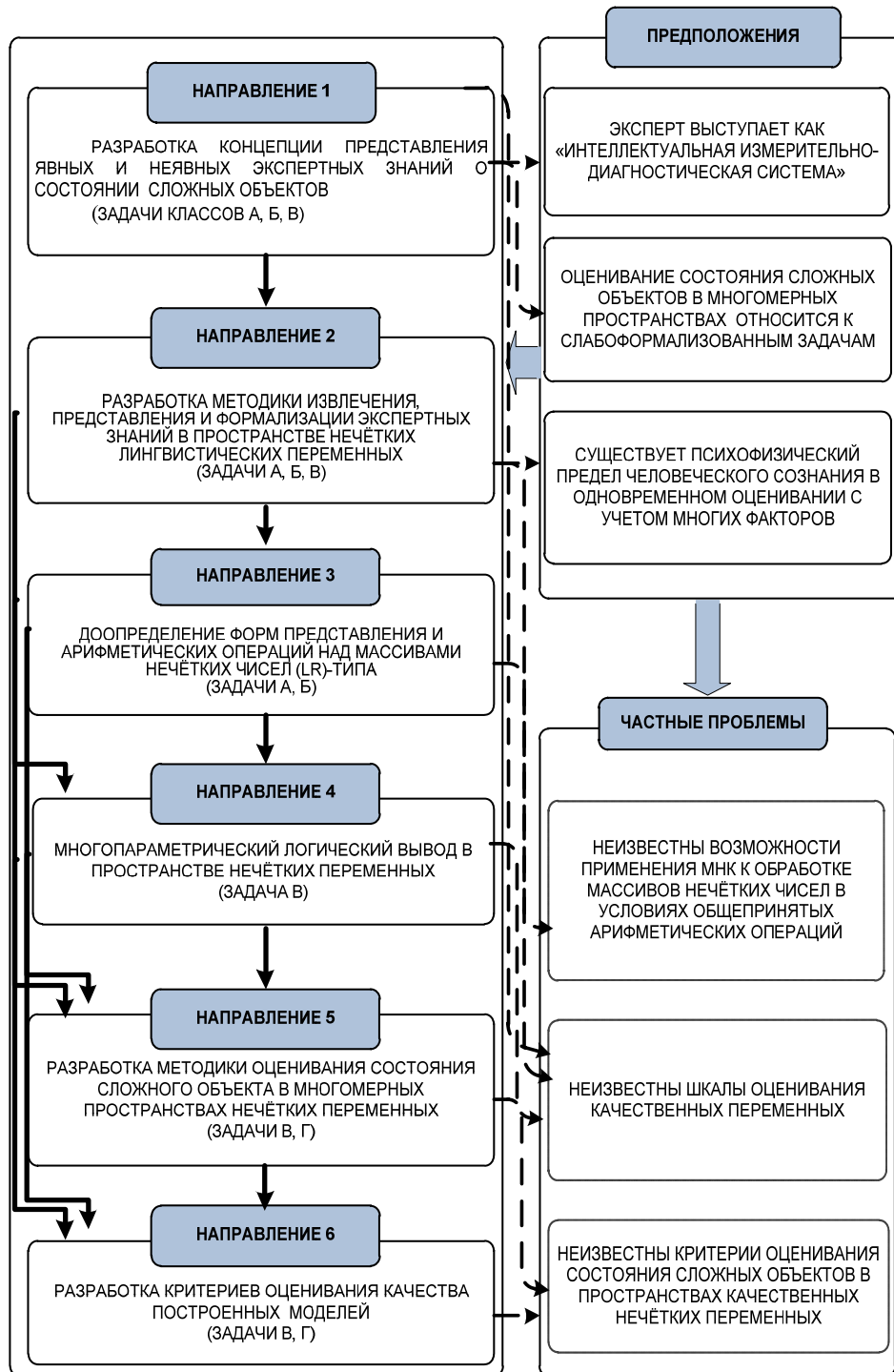


Рисунок 1.11 – Основные направления диссертационных исследований

Из анализа содержания рисунка 1.11 следует, что все описанные во введении научно-технические задачи, ориентированные на достижение сформулированной цели диссертации, решены в рамках соответствующих шести направлений исследований, изображенных на данном рисунке. На рисунке 1.12. представлены научно-методологические основы решения рассматриваемой в данной диссертации проблемы.

На основании результатов проведенного системного подхода на содержательном уровне суть решаемой в диссертации проблемы, сводится к следующему: *существуют метазнания эксперта (в общем случае экспертов)* об исследуемом СЛО, в которых содержатся сведения о составе и структуре характеристик, отражающих состояние СЛО; о допустимых пространственно-временных, технических и технологических ограничениях, определяющих особенности условий эксплуатации СЛО в рамках его целевого предназначения.

Требуется разработать методологию и специальное модельно-алгоритмическое обеспечение, а также соответствующие прототипы программных средств решения задач извлечения, формализации, обработки и использования явных и неявных экспертных знаний для оценивания состояния СЛО для с целью повышения оперативности и обоснованности принятия управленческих решений, связанных с функционированием указанных объектов в условиях неопределенности.

В последующих разделах будет приведена дальнейшая уточненная постановка, детализация и решение всех задач, входящих в перечисленные выше классы А, Б, В и Г.

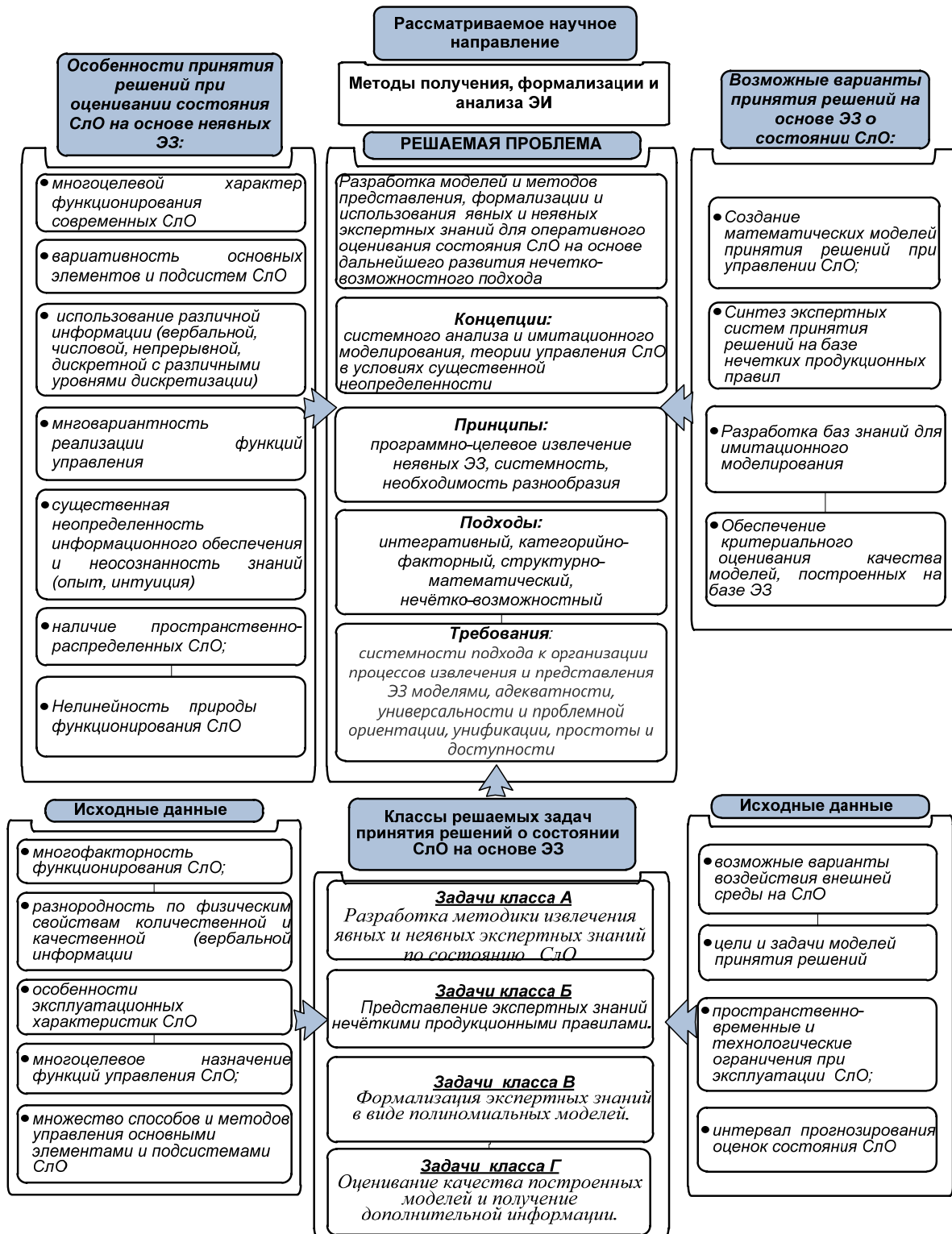


Рисунок 1.12 – Методологические основы решения проблемы извлечения и формализации явных и неявных экспертных знаний о состоянии СЛО

ВЫВОДЫ ПО 1 ГЛАВЕ

1. Актуальными направлениями проведения научных исследований в различных предметных областях в настоящее время являются описание и решение проблем сложности. Сложность как феномен требует расширения и выявления научно-системных парадигм для возможности управления ею. Поскольку доказано, что мозг человека превосходит любые суперкомпьютеры в решениях задач, связанных с обработкой нечеткой или неточной информацией, то использование экспертных знаний в различных областях науки и техники можно рассматривать как средство борьбы со сложностью. В связи с этим предлагаемые в диссертационном исследовании модели и методы представления и формализации экспертных знаний в виде аналитических выражений для их последующей компьютерной обработки представляются актуальными и могут рассматриваться как новый методологический подход к решению проблемы сложности.

2. В результате проведенного системного исследования и анализа установлено, что к настоящему времени в решении проблемы оценивания состояния СЛО накоплен значительный опыт как отечественных, так и зарубежных ученых. Несмотря на то, что предложенные ранее подходы, методы и модели позволяют находить конструктивные ответы на многие вопросы, связанные с мониторингом состояний СЛО, однако необходимых для решения задач оперативного и обоснованного оценивания состояния СЛО моделей, методов обработки экспертных знаний, их представления к виду удобному для последующего использования, разработано недостаточно. При этом ощущается настоятельная необходимость извлечения интеллектуального опыта экспертов как самого короткого пути создания содержательных и конструктивных моделей применительно к решению конкретных практических задач. Вместе с тем, практически во всех исследованиях отмечены многочисленные трудности такого пути из-за отсутствия методов и моделей при принятии решений о состоянии СЛО на основе явных и неявных экспертных знаний.

3. В ходе исследований установлено, что для преодоления препятствий на пути использования экспертных знаний в практической деятельности необходима

разработка новых приемов и подходов, способов и методов *извлечения, представления и формализации* накопленного опыта экспертов для создания моделей оценивания состояния СЛО и использования их в условиях реального времени. Ощущается недостаточность методологического обеспечения работы с экспертами. Так, в теории нечетких множеств слабо проработаны вопросы представления нечетких чисел и особенно арифметических действий над массивами нечетких чисел, что может приводить к некорректным результатам, а значит и последующим ошибочным выводам. Показано, что в целях корректного представления экспертных знаний в многомерном пространстве нечетких переменных необходима разработка новых форм задания нечетких чисел.

4. Анализ общепринятых арифметических действий над нечеткими числами показывает, что вопросы обработки массивов нечетких чисел в теории нечетких множеств рассматривались недостаточно для практического применения, поскольку не разработаны, например, способы преодоления катастрофического возрастания нечеткости при многократном выполнении арифметических операций даже над двумя нечеткими числами, не разрешена задача зависимости арифметических операций от форм представления нечеткого числа. Иными словами, формы представления нечетких чисел не учитывают специфику работы с ними.

5. Показано, что в процессе формализации знаний экспертов особое место занимают многомерные пространства нечетких переменных, поскольку сложные объекты, процессы или явления протекают именно в таких условиях. При этом эксперту всегда предпочтительнее работать в профессиональных метрических пространствах, что вызывает необходимость развития понятия меры и способа ее задания на множестве нечетких чисел в многомерных пространствах нечетких лингвистических переменных.

6. Проведено концептуальное и теоретико-множественное описание проблемы оценивания состояния СЛО на основе формализации явных и неявных экспертных знаний и показано, что процесс создания модели оценивания состояния СЛО должен состоять из трех последовательных взаимосвязанных процедур – *извлечения знаний, их представления и собственно формализации*. При этом

извлечение и представление знаний эксперта целесообразно проводить с использованием элементов теории нечетких множеств в виде нечетких лингвистических переменных и нечетких продукционных правил, используемых для формирования факторного пространства, описывающего представление эксперта о возможных путях решения данной конкретной задачи. Вопросы же структурирования множества продукционных правил при формализации экспертных знаний в виде аналитического выражения необходимо решать с привлечением методов теории планирования экспериментов на множестве вербальных ответов эксперта в многофакторном пространстве нечетких переменных.

7. Сформулированы и обоснованы основные направления исследований, связанные с созданием модельно-алгоритмического обеспечения автоматизации и интеллектуализации процессов оценивания состояния СЛО, информация о закономерностях функционирования которых существует в виде интуитивно-словесных и неявно-заданных экспертных знаний.

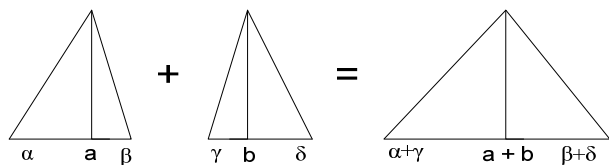
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВЫПОЛНЕНИЯ УНИФИЦИРОВАННЫХ АРИФМЕТИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ НАД НЕЧЕТКИМИ ЧИСЛАМИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫМИ ПРИ ФОРМАЛИЗАЦИИ ЭКСПЕРТНЫХ ЗНАНИЙ

Для формализации экспертных знаний, как показано в главе 1, необходимо построение математических моделей с использованием нечетких лингвистических переменных, нечетких чисел и арифметических операций над ними [3-5,10-16,22,23,27,61,69,81,294,295,307,314,319,320,325,326]. Решение таких задач базируется на применении традиционных и широко используемых в технических приложениях методах анализа нечетких систем. Математической основой традиционного подхода является алгебра нечетких чисел [3].

Разработка научно-методических основ формализации явных и неявных ЭЗ о Сло включает в себя целый ряд задач, представленных на рисунке 1.12. Для формирования лингвистических переменных как необходимого и важного этапа извлечения и представления экспертных знаний (*направление 3*, рисунок 1.10) требуются новые формы представления нечетких чисел и доопределение арифметических операций над ними. В математическом плане к настоящему времени слабо проработаны вопросы, связанные с унификацией форм представления арифметических операций над нечеткими числами, а также с потерей информативности в смысле «расползания» первоначальной нечеткости нечетких чисел при арифметических действиях над ними, что особо негативно сказывается при практическом представлении и формализации опыта и знаний эксперта о состоянии Сло.

Проведенный анализ процессов формализации экспертных знаний показывает, прежде всего, недостаточность форм, которыми эксперт может выразить свои знания. Одной из общепризнанных форм является нечеткость информации, которую эксперт способен выразить в виде некоторого интервала своих суждений. Обычно интервалы задаются на некоторой произвольной шкале в виде нечетких чисел, но существующие формы представления нечетких чисел не всегда способны передать полноту знаний эксперта даже в таком виде. Суть в том,

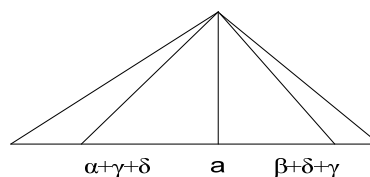
что нечеткие числа являются только формальной частью отражения экспертных знаний, но в настоящем виде арифметика работы с нечеткими числами вступает в противоречия с практикой работы самих экспертов. Так, существующие формы представления нечетких чисел сильно зависят от формы представления самого числа и от его знака. Но это еще не все недостатки нечетких чисел как фундаментального выражения их сути, главное – общепринятые в настоящее время арифметические операции над нечеткими числами *недоопределены*. Например, многократное сложение и вычитание двух нечетких чисел $(A(a, \alpha, \beta))$ и $(B(b, \gamma, \delta))$ приводит к абсурдному результату в виде катастрофического расползания нечеткости до такой величины, при которой теряется смысл всего арифметического действия. Геометрически в общепринятой форме арифметических операций это выглядит следующим образом:

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


затем

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

$$= (a, \alpha + \gamma + \delta, \beta + \delta + \gamma)$$



и т.д. с нарастанием нечеткости.

Нечеткие числа как отражение нечеткости самого понятия «численное значение» в детерминированном математическом представлении выражает отношение эксперта-человека к «жизненному восприятию» оцениваемого им признака. Поэтому для правильного восприятия арифметические действия над нечеткими числами не должны противоречить здравому смыслу.

Учитывая вышеизложенное, в диссертации введены: новое представление нечетких чисел, унифицированные формы представления расширенных и

дополнительных арифметических операций над ними, доказана корректность применения нововведений в нечеткой математике.

За основу взяты определения нечетких чисел из работы [3].

2.1 РАЗРАБОТКА УНИФИЦИРОВАННОЙ ФОРМЫ ЗАПИСИ РАСШИРЕННЫХ АРИФМЕТИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ, НЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ К ЗНАКУ НЕЧЕТКИХ ЧИСЕЛ

2.1.1 Введение симметризованной формы представления

При решении задач математического моделирования систем обычно используют некоторые типы нечетких чисел, предлагающие более простую интерпретацию расширенных бинарных арифметических операций. К ним относятся (LR)-тип и трапецеидальный [81].

Для решения сформулированной проблемы в целом приведем основные определения и формы представления некоторых типов нечетких чисел и арифметических операций над ними.

Определение 2-1. Нечеткое унимодальное число A является нечетким числом (LR)-типа тогда и только тогда, когда функции принадлежности имеют вид:

$$\begin{aligned} \mu_A(X) &= L\left(\frac{a-x}{\alpha}\right), & \forall x \leq a, \alpha > 0, \\ \mu_A(X) &= R\left(\frac{x-a}{\beta}\right), & \forall x \geq a, \beta > 0, \end{aligned} \quad (2.1)$$

где a – значение (мода) нечеткого числа;

α, β – левый и правый коэффициенты нечеткости нечеткого числа.

Тогда нечеткое число будет иметь вид $A = (a, \alpha, \beta)$.

Проанализируем достаточность общепринятых арифметических операций над нечеткими числами (LR)-типа для решения поставленной в диссертации проблемы.

1. Сложение нечетких чисел

Рассмотрим возрастающие части нечетких чисел $A = (a, \alpha, \beta)$ и $B = (b, \gamma, \delta)$.

Пусть x и y – единственные действительные числа, такие что

$$L\left(\frac{a-x}{\alpha}\right) = \omega = L\left(\frac{b-y}{\gamma}\right),$$

где ω есть фиксированное значение интервала $[0,1]$.

Это эквивалентно тому, что

$$x = a - \alpha L^{-1}(\omega), y = b - \gamma L^{-1}(\omega). \quad (2.2)$$

Из (2.2) следует

$$z = x + y = a + b - (\alpha + \gamma)L^{-1}(\omega) \text{ и}$$

$$L\left(\frac{a+b-z}{\alpha+\gamma}\right) = \omega.$$

Аналогично для убывающих частей нечетких чисел A, B :

$$R\left(\frac{z-a-b}{\beta+\delta}\right) = \omega. \quad (2.3)$$

Исходя из этого

$$(a, \alpha, \beta)_{LR} \oplus (b, \gamma, \delta)_{LR} = (a+b, \alpha+\gamma, \beta+\delta)_{LR}. \quad (2.4)$$

2. Вычитание нечетких чисел

Если

$$-(b, \gamma, \delta)_{LR} = (-b, \gamma, \delta)_{LR},$$

$$\text{то } (a, \alpha, \beta)_{LR} \ominus (b, \gamma, \delta)_{LR} = (a-b, \alpha+\delta, \beta+\gamma)_{LR}. \quad (2.5)$$

3. Умножение нечетких чисел

Вследствие того, что по умножению нечеткие числа (LR)-типа не образуют группу, операции умножения и деления не приводят к числам того же типа, но, как показано в [282], с точностью до величин порядка

$$\begin{cases} \alpha a^{-2} \ll 1, \beta b^{-2} \ll 1 \\ (\delta a + \alpha b) * b^{-2} \ll 1, (\gamma a + \beta b) * b^{-2} \ll 1 \end{cases} \quad (2.6)$$

можно пользоваться следующими простыми приближенными формулами умножения нечетких чисел:

$$3a) \quad \forall A, B: \mu_A, \mu_B \in F(R^+), a > 0, b > 0$$

$$(a, \alpha, \beta)_{LR} \otimes (b, \gamma, \delta)_{LR} = (ab, a\gamma + b\alpha, a\delta + b\beta)_{LR}; \quad (2.7)$$

$$3b) \quad \forall A, B: \mu_A, \mu_B \in F(R), a < 0, b > 0$$

$$(a, \alpha, \beta)_{LR} \otimes (b, \gamma, \delta)_{LR} = (ab, b\alpha - a\delta, b\beta - a\gamma)_{LR}; \quad (2.8)$$

3с) $\forall A, B: \mu_A, \mu_B \in F(R^-), a < 0, b < 0$

$$(a, \alpha, \beta)_{LR} \otimes (b, \gamma, \delta)_{LR} = (ab, -b\beta - a\delta, -b\alpha - a\gamma)_{LR}; \quad (2.9)$$

4. Обратное нечеткое число

Учитывая, что

$$\forall A: \mu_A \in F\left(\frac{R}{\{0\}}\right), a > 0, \mu_{A^{-1}}(x) = \mu_A\left(\frac{1}{x}\right),$$

уравнение для правой части A^{-1} примет вид:

$$\mu_{A^{-1}}(x) = L\left(\frac{1-ax}{\alpha x}\right), x \geq 1/a,$$

где

$$A = (a, \alpha, \beta)_{LR}.$$

Следует отметить, что правая часть строится одновременно с левой частью нечеткого числа A . Более того, A не является нечетким числом ни (LR)-, ни (RL)-типа. Однако если мы рассмотрим только окрестность $1/a$, то

$$\frac{1-ax}{\alpha x} = \frac{\frac{1}{a} - x}{\frac{\alpha}{a^2}}.$$

Тогда A^{-1} может быть аппроксимировано нечетким числом (RL)-типа:

$$(a, \alpha, \beta)_{LR}^{-1} = \left(\frac{1}{a}, \frac{\beta}{a^2}, \frac{\alpha}{a^2}\right)_{RL}. \quad (2.10)$$

5. Деление нечетких чисел

Для определения этой операции воспользуемся равенством

$$M \oslash N = M \otimes N^{-1}$$

и выражениями (2.7), (2.10).

Для положительных нечетких чисел (LR)- и (RL)-типа, получаем приближенный результат:

$$\forall A, B: \mu_A, \mu_B \in F(R^+), a > 0, b > 0$$

$$(a, \alpha, \beta)_{LR} \oslash (b, \gamma, \delta)_{LR} = \left(a/b, \frac{a\delta + b\alpha}{b^2}, \frac{a\gamma + b\beta}{b^2}\right)_{LR}. \quad (2.11)$$

Аналогичная формула может быть получена, когда A и/или B – отрицательные.

6. Возведение в степень нечеткого числа

Пользуясь (2.7) и (2.9), легко получить выражение для определения степени нечеткого числа A^n .

$$6a) \quad \forall A: \mu_A \in F(R^+), a > 0, n \geq 0$$

$$A^n(a, \alpha, \beta)_{LR}^n = (a^n, n(a)^{n-1} \alpha, n(a)^{n-1} \beta)_{LR}; \quad (2.12)$$

$$6b) \quad \forall A: \mu_A \in F(R^+), a > 0, n < 0,$$

$$A^n(a, \alpha, \beta)_{LR}^n = (a^n, |n|(a)^{n-1} \beta, |n|(a)^{n-1} \alpha)_{LR}. \quad (2.13)$$

Выражения для определения A^n , где A – отрицательное, получают аналогично.

Свойства расширенных операций над нечеткими числами [3]:

$$(A \oplus B) \oplus C = A \oplus (B \oplus C), \quad (2.14)$$

$$(A \otimes B) \otimes C = A \otimes (B \otimes C), \quad (2.15)$$

$$A \oplus B = B \oplus A, \quad (2.16)$$

$$A \otimes B = B \otimes A, \quad (2.17)$$

$$A \oplus (-A) \neq 0, \quad (2.18)$$

$$A \otimes (1 \ominus A) \neq 1. \quad (2.19)$$

Если A – положительное (отрицательное) нечеткое число и если B, C – оба положительные (отрицательные) нечеткие числа, то

$$A \otimes (B \oplus C) = (A \otimes B) \oplus (A \otimes C). \quad (2.20)$$

7. Сравнение нечетких чисел

В терминах теории возможностей [81,284] предлагаются следующие четыре показателя для сравнения нечетких чисел:

$$Pos(\bar{A} \geq \underline{B}) = \sup_{u \geq v} \{ \min(\mu_A(u), \mu_B(v)) | u > v \}, \quad (2.21)$$

$$Pos(\bar{A} > \bar{B}) = \sup_{u \geq v} \inf \{ \min(\mu_A(u), 1 - \mu_B(v)) | u < v \}, \quad (2.22)$$

$$Nec(\underline{A} \geq \underline{B}) = \inf_{u \leq v} \sup \{ \max(1 - \mu_A(u), \mu_B(v)) | u > v \}, \quad (2.23)$$

$$Nec(\underline{A} > \bar{B}) = 1 - \sup_{u \leq v} \{ \min(\mu_A(u), \mu_B(v)) | u < v \}. \quad (2.24)$$

Используя (2.21)-(2.24), можно ввести показатели равенства нечетких чисел:

$$Pos(A = B) = \min(Pos(\bar{A} \geq \underline{B}), 1 - Nec(\underline{A} > \bar{B})); \quad (2.25)$$

$$Nec(A = B) = \min(Nec(\underline{A} \geq \underline{B}), 1 - Pos(\bar{A} > \bar{B}), 1 - Pos(\bar{B} > \bar{A}), Nec(\underline{A} \geq \underline{B})) \quad (2.26)$$

Непосредственное вычисление значений показателей сравнения для нечетких чисел (LR)-типа $A = (a, \alpha, \beta)$ и $B = (b, \gamma, \delta)$ можно проводить по следующим формулам:

$$Pos(\bar{A} \geq \underline{B}) = \max(0, \min(1, 1 + \frac{a - b}{\beta + \gamma})); \quad (2.27)$$

$$Nec(\underline{A} \geq \underline{B}) = \max(0, \min(1, \frac{a - b + \gamma}{\alpha + \gamma})); \quad (2.28)$$

$$Pos(\underline{A} > \underline{B}) = \max(0, \min(1, \frac{a - b + \beta}{\beta + \delta})); \quad (2.29)$$

$$Nec(\underline{A} > \bar{B}) = \max(0, \min(1, \frac{a - b}{\alpha + \delta})). \quad (2.30)$$

Следует отметить, что (2.27) – (2.30) не справедливы тогда, когда суммы коэффициентов нечеткости в знаменателях вышеприведенных выражений равны нулю. В этом случае коэффициенты нечеткости заменяют на фиктивные, чтобы обеспечить существование точек пересечения.

Таким образом, четыре рассмотренных показателя (2.27) – (2.30) содержат всю информацию, необходимую для сравнения и упорядочения нечетких чисел.

Другим широко используемым в рамках теории нечетких множеств типом нечетких чисел является трапецеидальный тип, который может быть использован для моделирования нечеткого интервала. Данный тип определяется следующим образом:

$$\mu_M(x) = \begin{cases} L(\frac{m_1 - x}{\alpha}), & x \leq m_1, \alpha > 0 \\ R(\frac{x - m_2}{\beta}), & x \geq m_2, \beta > 0 \\ 1, & m_1 < x < m_2 \end{cases} \quad (2.31)$$

Обозначим его $M = (m_1, m_2, \alpha, \beta)_{LR}$. Тогда расширенное сложение как частный случай (2.4) примет вид:

$$(m_1, m_2, \alpha, \beta)_{LR} \oplus (n_1, n_2, \gamma, \delta)_{LR} = (m_1 + n_1, m_2 + n_2, \alpha + \gamma, \beta + \delta)_{LR},$$

$$(m_1, m_2, \alpha, \beta)_{LR} \otimes (n_1, n_2, \gamma, \delta)_{LR} = (m_1 n_1, m_2 n_2, m_1 \gamma + n_1 \alpha, m_2 \delta + n_2 \beta)_{LR}. \quad (2.32)$$

Другие операции определяют аналогично.

Формулы расширенных арифметических операций, как следует из (2.4)-(2.9), (2.32), зависят от знака нечеткого числа. Это вызывает затруднение в выборе формы арифметической операции при вычислении решения нечеткого выражения.

Кроме того, из свойств расширенных операций над нечеткими числами нельзя получить точных границ для интервала $[-1, +1]$, необходимых при применении методов планирования экспериментов в рамках решаемой проблемы, как одного из главных элементов синтеза нечетких аналитических моделей (см. главу 1).

Для преодоления указанных недостатков введем представление расширенных арифметических операций в форме, нечувствительной к знаку НЧ путем введения симметризованной параметрической их формы.

Для этого рассмотрим следующие понятия с соответствующими им доказательствами.

Определение 2-2. Показателем нечеткости нечеткого числа $A = (a, \alpha, \beta)$, $\alpha \geq 0, \beta \geq 0$ назовем

$$d(A) = \frac{\alpha + \beta}{2} \geq 0. \quad (2.33)$$

Определение 2-3. Коэффициентом асимметрии нечеткого числа $A = (a, \alpha, \beta)$, называется величина, определяемая как

$$\Delta(A) = \frac{\beta - \alpha}{2}. \quad (2.34)$$

Из введенных определений следует, что $\alpha = d(A) - \Delta(A)$, $\beta = d(A) + \Delta(A)$ и $d(A) \geq 0$. Для того, чтобы α, β при обратном преобразовании были неотрицательными требуется выполнения следующего неравенства $d(A) \geq |\Delta(A)| \geq 0$.

Учитывая (2.33) и (2.34), введем определение симметризованного параметрического представления нечеткого числа (LR)-типа.

Определение 2-4. Симметризованным параметрическим представлением нечеткого числа A (LR)-типа назовем кортеж

$$A = (a, d(A), \Delta(A)). \quad (2.35)$$

при условии $d(A) \geq |\Delta(A)|$.

Покажем связь между общепринятым параметрическим представлением НЧ и симметризованным параметрическим представлением нечетких чисел.

Утверждение 2-1. $\forall A : \mu_A \in F(R)$ справедливо следующее:

$$A = (a, \alpha, \beta) \Leftrightarrow A = (a, d(A), \Delta(A)).$$

Доказательство:

Возьмем нечеткое число $A = (a, \alpha, \beta), \alpha \geq 0, \beta \geq 0$.

$$\begin{aligned} A = (a, \alpha, \beta) &= \left(a, \frac{(\alpha + \beta) - (\beta - \alpha)}{2}, \frac{(\alpha + \beta) + (\beta - \alpha)}{2} \right) = \\ &= (a, d(A) - \Delta(A), d(A) + \Delta(A)). \end{aligned}$$

Из того, что $\alpha \geq 0, \beta \geq 0$, следует $d(A) \geq |\Delta(A)| \geq 0$. Следовательно, нечеткое число можно представить в симметризованном виде

$$\dot{A} = (a, d(A), \Delta(A)).$$

Докажем обратное:

Возьмем нечеткое число в симметризованном виде $A = (a, d(A), \Delta(A))$, причем $d(A) \geq |\Delta(A)|$. Тогда однозначно вычисляются неотрицательные параметры нечеткого числа $A = (a, \alpha, \beta) : \alpha = d(A) - \Delta(A), \beta = d(A) + \Delta(A)$.

Что и требовалось доказать.

Арифметические операции над нечеткими числами (LR)-типа в симметризованном виде представим ниже.

2.1.2 Расширенные арифметические операции над нечеткими числами в симметризованном виде

Определение 2-5. Для симметризованного параметрического представления нечетких чисел $A = (a, d(A), \Delta(A))$ и $B = (b, d(B), \Delta(B))$ определим операции $\{\oplus, \ominus, \otimes, \oslash\}$ из множества расширенных арифметических операций следующим образом:

$$A \oplus B = (a + b, d(A) + d(B), \Delta(A) + \Delta(B)) , \quad (2.36)$$

$$A \ominus B = (a - b, d(A) + d(B), \Delta(A) - \Delta(B)), \quad (2.37)$$

$$A \otimes B = (ab, |a|d(B) + |b|d(A), a\Delta(B) + b\Delta(A)) \quad (2.38)$$

$$A \oslash B = \left(\frac{a}{b}, \frac{|a|d(B) + |b|d(A)}{b^2}, \frac{b\Delta(A) - a\Delta(B)}{b^2} \right), \quad (2.39)$$

$$\frac{1}{B} = \left(\frac{1}{b}, \frac{d(B)}{b^2}, -\frac{\Delta(B)}{b^2} \right) \text{ при условии } 0 \notin B.$$

Доказательства тождественности арифметических операций над нечеткими числами (LR)-типа при симметризованной форме их представления приведены в Приложении 1.

Предлагаемое ниже утверждение наглядно показывает нечувствительность введенных расширенных арифметических операций (2.36) – (2.39) к знаку нечетких чисел.

Определение 2-2. Показателем нечеткости нечеткого числа $A = (a, \alpha, \beta), \alpha \geq 0, \beta \geq 0$ назовем

$$d(A) = \frac{\alpha + \beta}{2} \geq 0 .$$

Определение 2-3. Коэффициентом асимметрии нечеткого числа $A = (a, \alpha, \beta)$ называется величина, определяемая как

$$\Delta(A) = \frac{\beta - \alpha}{2}$$

Из введенных определений следует, что $\alpha = d(A) - \Delta(A)$, $\beta = d(A) + \Delta(A)$ и $d(A) \geq 0$. Для того, чтобы α, β были неотрицательными требуется выполнения следующего неравенства $d(A) \geq |\Delta(A)| \geq 0$.

Учитывая введенные выше определение дополним их еще определением, связанным с описанием симметризованного параметрического представления нечеткого числа (LR)-типа.

Определение 2-4. Симметризованным параметрическим представлением нечеткого числа A (LR)-типа назовем кортеж

$$A = (a, d(A), \Delta(A)), \quad (2.40)$$

при условии $d(A) \geq |\Delta(A)|$.

Покажем связь между общепринятым параметрическим представлением НЧ и симметризованным параметрическим представлением нечетких чисел.

Утверждение 2-1. $\forall A \in F(\mathbb{R})$ справедливо следующее:

$$A = (a, \alpha, \beta) \Leftrightarrow A = (a, d(A), \Delta(A)).$$

Доказательство:

Возьмем нечеткое число $A = (a, \alpha, \beta), \alpha \geq 0, \beta \geq 0$.

$$\begin{aligned} A = (a, \alpha, \beta) &= \left(a, \frac{(\alpha + \beta) - (\beta - \alpha)}{2}, \frac{(\alpha + \beta) + (\beta - \alpha)}{2} \right) = \\ &= (a, d(A) - \Delta(A), d(A) + \Delta(A)) \end{aligned}$$

Из того, что $\alpha \geq 0, \beta \geq 0$, следует $d(A) \geq |\Delta(A)| \geq 0$. Следовательно, нечеткое число можно представить в симметризованном виде $A = (a, d(A), \Delta(A))$.

Докажем обратное:

Возьмем нечеткое число в симметризованном виде $A = (a, d(A), \Delta(A))$, причем $d(A) \geq |\Delta(A)|$. Тогда однозначно вычисляются неотрицательные параметры нечеткого числа $A = (a, \alpha, \beta)$: $\alpha = d(A) - \Delta(A)$ и $\beta = d(A) + \Delta(A)$.

Что и требовалось доказать.

Предлагаемое ниже утверждение наглядно показывает нечувствительность введенных расширенных арифметических операций (2.36) – (2.39) к знаку нечетких чисел.

Утверждение 2-2. $\forall A, B \in F(R)$ будет справедливо

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

$$(a, \alpha, \beta)_{LR} \otimes (b, \gamma, \delta)_{LR} = (ab, a\gamma + b\alpha, a\delta + b\beta)_{LR}, a > 0, b > 0; \quad (2.41)$$

$$(a, \alpha, \beta)_{LR} \otimes (b, \gamma, \delta)_{LR} = (ab, b\alpha - a\delta, b\beta - a\gamma)_{LR}, a < 0, b > 0;$$

$$(a, \alpha, \beta)_{LR} \otimes (b, \gamma, \delta)_{LR} = (ab, -b\beta - a\delta, -b\alpha - a\gamma)_{LR}, a < 0, b < 0.$$

Доказательство.

Случай 1. $\forall A, B: \mu_A, \mu_B \in F(R^+), a > 0, b > 0.$

Из условия следует, что $|a| = a, |b| = b$. Тогда

$$A \otimes B = (ab, |a|d(B) + |b|d(A), a\Delta(B) + b\Delta(A)). \quad (2.42)$$

Согласно утверждению 2-1 (2.41) примет вид

$$(ab, a\gamma + b\alpha, a\delta + b\beta)_{LR} =$$

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

$$= (ab, ad(B) + bd(A) - a\Delta(B) - b\Delta(A), ad(B) + bd(A) + a\Delta(B) + b\Delta(A)) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow (ab, |a|d(B) + |b|d(A), a\Delta(B) + b\Delta(A)) \quad (2.43)$$

Случай 2. $\forall A, B: \mu_A \in F(R^-), \mu_B \in F(R^+), a < 0, b > 0,$

Из условия следует, что $|a| = -a, |b| = b$. Тогда

$$(ab, b\alpha - a\delta, b\beta - a\gamma)_{LR} = (ab, -a(d(B) + \Delta(B)) + b(d(A) - \Delta(A)), -a(d(B) - \Delta(B)) + b(d(A) + \Delta(A))) =$$

$$= (ab, -ad(B) + bd(A) - a\Delta(B) + b\Delta(A), -ad(B) + bd(A) + a\Delta(B) + b\Delta(A)) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow (ab, |a|d(B) + |b|d(A), a\Delta(B) + b\Delta(A)). \quad (2.44)$$

Случай 3. $\forall A, B: \mu_A, \mu_B \in F(R^-), a < 0, b < 0.$

Из условия следует, что $|a| = -a, |b| = -b$. Тогда

$$(ab, -b\beta - a\delta, -b\alpha - a\gamma)_{LR} = (ab, -ad(B) - a\Delta(B) - bd(A) + b\Delta(A), -ad(B) + a\Delta(B) - bd(A) + b\Delta(A)) =$$

$$= (ab, -ad(B) - bd(A) - a\Delta(B) + b\Delta(A), -ad(B) - bd(A) + a\Delta(B) + b\Delta(A)) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow (ab, |a|d(B) + |b|d(A), a\Delta(B) + b\Delta(A)). \quad (2.45)$$

Таким образом, из (2.43) – (2.45) вытекает справедливость (2.41), что и доказывает утверждение 2-2.

Для расширенных арифметических операций (2.36) – (2.40) нечувствительность к знаку симметризованных нечетких чисел доказывается аналогично.

Следует отметить, что предложенная форма представления расширенных арифметических операций над нечеткими числами (LR)-типа позволила получить унифицированную форму представления расширенных операций в симметризованном виде.

2.2 ОБОБЩЕНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ АРИФМЕТИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ НАД НЕЧЕТКИМИ ЧИСЛАМИ (LR)-ТИПА ЗНАКОПЕРЕМЕННОГО РЯДА

2.2.1 Определение дополнительной арифметической операции

При анализе математических моделей нечетких систем в некоторых случаях возникает необходимость решения нечетких уравнений. Эти уравнения представляют определенный интерес в связи с задачами оценивания состояния СЛО, принятия решений и многими другими задачами, которые носят нечеткий характер.

Перейдем к исследованию нечетких уравнений. Определение нечеткого уравнения возьмем из [62].

Определение 2-6. Нечетким уравнением будем называть соотношение вида:

$$F(X, A_1, \dots, A_n) \subseteq B, \quad (2.46)$$

где $F(X, A_1, \dots, A_n)$ – значение нечеткой функции от нечетких чисел, A_1, \dots, A_n, B – известные нечеткие числа, X – неизвестное нечеткое число.

Согласно принципу расширения Заде [81,282] нечеткое число X является решением нечеткого уравнения (2.45), если $\forall t \in (-\infty, +\infty)$, таких что $F^{-1}(t) = \emptyset$

$$\mu_F(t) = \sup_{F(x, a_1, \dots, a_n) = t} \min[\mu_X(x), \mu_A(a_1), \dots, \mu_A(a_n)] \quad (2.47)$$

Уже в первой работе по нечеткой арифметике [313] было указано, что расширенные операции «сложение – вычитание», «умножение – деление» на основании свойств (2.8), (2.9) не позволяют отыскать соответственно

противоположное и обратное нечеткое число. Из вышесказанного в [324] был сделан вывод о невозможности точного решения нечетких уравнений. Однако в [10,43] была высказана идея дополнительных операций вычитания, деления и высказана гипотеза, что с их помощью точное решение нечетких уравнений становится возможным.

Ниже с использованием идей и методов символьной математики дано такое определение дополнительной арифметической операции, которое соответствует цели данного раздела – решению нечетких уравнений. Оно обобщает определения, данные предыдущими исследователями, и дает возможность выразить все необходимые дополнительные арифметические операции над нечеткими числами с сохранением первоначальной нечеткости [78,242,259].

Необходимость введения дополнительных операций вызвана, в первую очередь, тем обстоятельством, что с точки зрения здравого смысла и опыта психологов экспериментатор-эксперт не может в определении одного и того же признака употреблять различные степени нечеткости в одном эксперименте. Таким образом, расползание нечеткости при работе с нечеткими числами (LR)-типа внутри одного знакопеременного ряда, как это имеет место с использованием арифметических операций в существующем виде, противоречит практике экспертов и требует доопределения.

С учетом методов символьной математики введем следующее определение.

Определение 2-7. Дополнительной арифметической операцией, обозначаемой $*$ _{доп}, называется такая, что

$$C = A *_{\text{доп}} B \rightarrow C *_{\text{доп}} B = A, \quad (2.48)$$

где A, B, C – нечеткие числа;

$*$ – расширенная арифметическая операция, противоположная $*$ _{доп}.

Для реализации дополнительных арифметических операций над нечеткими числами при решении нечетких уравнений удобнее пользоваться множествами α - уровня.

Используя (2.48), дополнительные арифметические операции для выражений (2.4) – (2.11) примут вид:

1. Дополнительное сложение

$$A \underset{\text{доп}}{\otimes} B = \bigcup_{\alpha} \alpha (\delta_A + \gamma_B, \gamma_A + \delta_B). \quad (2.49)$$

2. Дополнительное вычитание

$$A \ominus_{\text{доп}} B = \bigcup_{\alpha} \alpha (|\delta_A - \gamma_B|, |\gamma_A - \delta_B|). \quad (2.50)$$

3. Дополнительное умножение

$$A \underset{\text{доп}}{\otimes} B = \bigcup_{\alpha} \alpha (\delta_A \gamma_B, \gamma_A \delta_B). \quad (2.51)$$

4. Дополнительное деление

$$A \ominus_{\text{доп}} B = \bigcup_{\alpha} \alpha \left(\frac{\delta_A}{\delta_B}, \frac{\gamma_A}{\gamma_B} \right). \quad (2.52)$$

2.2.2 Свойства дополнительных арифметических операций

Дополнительные арифметические операции обладают следующими свойствами:

$$(A \underset{\text{доп}}{\oplus} B) \underset{\text{доп}}{\oplus} C \neq A \underset{\text{доп}}{\oplus} (B \underset{\text{доп}}{\oplus} C), \quad (2.53)$$

$$(A \underset{\text{äi i}}{\otimes} B) \underset{\text{äi i}}{\otimes} C \neq A \underset{\text{äi i}}{\otimes} (B \underset{\text{äi i}}{\otimes} C), \quad (2.54)$$

$$A \underset{\text{доп}}{\oplus} 0 = A, \quad (2.55)$$

$$A \ominus_{\text{доп}} 1 = A \quad (2.56)$$

$$A \ominus_{\text{доп}} A = 0 \quad (2.57)$$

$$A \ominus_{\text{доп}} A = 1, \quad (2.58)$$

$$(A \underset{\text{доп}}{\oplus} B) \ominus_{\text{доп}} A = B, \quad (2.59)$$

$$(A \underset{\text{доп}}{\otimes} B) \ominus_{\text{доп}} A = B, \quad (2.60)$$

$$(A \underset{\text{äi i}}{\oplus} B) \ominus_{\text{доп}} A = (-1)B, \quad (2.61)$$

$$(A \underset{\text{äi i}}{\otimes} B) \ominus_{\text{доп}} A = (-B). \quad (2.62)$$

Для того, чтобы убедиться в справедливости свойств (2.52)-(2.61), докажем (2.62). Другие свойства доказываются аналогичным образом, как показано в Приложении I.

Пусть A, B – нечеткие числа. Учитывая выпуклость функций принадлежности, их подмножества α -уровней A_α, B_α -интервалы на R , имеющие вид: $A_\alpha = [a_1, a_2], B_\alpha = [b_1, b_2]$

Для левой части по (2.48), (2.49) имеем:

$$\begin{aligned} [(A \oplus B) \ominus_{\text{доп}} A]_\alpha &= [(A \oplus B)_\alpha \ominus_{\text{доп}} A_\alpha = (A_\alpha \oplus_{\text{доп}} B_\alpha) \ominus_{\text{доп}} A_\alpha = \\ &= ([a_1, a_2] \oplus_{\text{доп}} [b_1, b_2]) \ominus_{\text{доп}} [a_1, a_2] = [a_1 + a_2], [b_1 + b_2] \ominus_{\text{доп}} [a_1, a_2] = \\ &= [a_1 + b_2 - a_1, a_2 + b_1 - a_2] = [b_2, b_1] = (-1) * [b_1, b_2] = (-1) * B. \end{aligned}$$

Что и требовалось доказать.

При построении математических моделей СЛО наиболее часто используемым видом нечетких уравнений являются уравнения, определяемые нечеткими числами (LR)-типа. Подходы к их решению продемонстрированы в [11,43]. В процессе построения решения они используют разложение нечетких чисел по системе уровневых множеств, что даже при небольших массивах обрабатываемых данных существенно снижает эффективность вычислительных процедур и значительно усложняет реализацию на ЭВМ.

Параметрическое представление дополнительных арифметических операций для симметризованных нечетких чисел используется при решении нечетких уравнений с числами (LR)-типа [224,242,243].

Дополнительные арифметические операции над нечеткими числами (LR)-типа $A = (a, d(A), \Delta(A))$ и $B = (b, d(B), \Delta(B))$ как частный случай (2.36) - (2.39) примут вид:

$$A \oplus_{\text{доп}} B = (a + b, |d(A) - d(B)|, \Delta(A) + \Delta(B)); \quad (2.63)$$

$$A \ominus_{\text{доп}} B = (a - b, |d(A) - d(B)|, \Delta(A) - \Delta(B)); \quad (2.63a)$$

$$A \otimes_{\text{доп}} B = (ab, |b|d(A) - |a|d(B), |a|\Delta(B) + |b|\Delta(A)); \quad (2.64)$$

$$A \circlearrowleft_{\text{доп}} \hat{A} = \left(\frac{a}{b}, \frac{|b|d(A) - |a|d(B)|}{b^2}, \frac{|\hat{a}|\Delta(A) - |\hat{a}|\Delta(B)|}{b^2} \right). \quad (2.65)$$

Доказательства справедливости дополнительных арифметических операций (2.63) – (2.65) приведены в Приложении I.

Таким образом, рассмотренные дополнительные арифметические операции делают возможным решение нечетких уравнений.

2.3 РЕШЕНИЕ НЕЧЕТКИХ УРАВНЕНИЙ В ПРОСТРАНСТВЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ АРИФМЕТИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ

2.3.1 Равносильные нечеткие уравнения и равносильные переходы

Одной из особенностей решения нечетких уравнений является неукоснительное обеспечение одинаковости нечеткости их обеих частей. Поэтому ниже рассмотрим более детально вопросы равносильных уравнений и равносильных переходов [223,243].

Рассмотрим равенство $R(\tilde{X}) = Q(\tilde{X})$ двух выражений $R(\tilde{X})$ и $Q(\tilde{X})$, содержащих нечеткие величины. Согласно [81] оно понимается как равенство соответствующих функций принадлежности. Следовательно, величина нечеткости будет одинаковой для обоих членов равенства. Допустимый перенос нечеткой части выражения $R(\tilde{X})$ в правую часть выражения $Q(\tilde{X})$ может осуществляться с помощью равносильных переходов (определение равносильного перехода приводится ниже), которые одновременно изменяют нечеткость в члене $Q(\tilde{X})$.

Подобные действия могут быть произведены с помощью дополнительных арифметических операций, введенных выше.

Определение 2-8. Два нечетких уравнения $R(\tilde{X}) = Q(\tilde{X})$ и $S(\tilde{X}) = T(\tilde{X})$ называются равносильными, если любой корень первого уравнения является корнем второго уравнения и наоборот.

Определение 2-9. Замена одного нечеткого уравнения равносильным ему другим уравнением называется равносильным переходом от одного уравнения к другому. Равносильность обозначается

$$R(\tilde{X}) = Q(\tilde{X}) \Leftrightarrow S(\tilde{X}) = T(\tilde{X}).$$

Сформулируем некоторые утверждения, при помощи которых будут совершаться равносильные переходы.

Утверждение 2-3 $R(\tilde{X}) = Q(\tilde{X}) \Leftrightarrow R(\tilde{X}) \ominus_{\text{доп}} Q(\tilde{X}) = 0.$

Утверждение 2-4. $R(\tilde{X}) = Q(\tilde{X}) \Leftrightarrow R(\tilde{X}) \ominus_{\text{доп}} Q(\tilde{X}) = 1.$

Утверждение 2-5. $\forall \tilde{A} : \mu_A \in F(R)$

$$R(\tilde{X}) = Q(\tilde{X}) \Leftrightarrow R(\tilde{X}) \oplus \tilde{A} = Q(\tilde{X}) \oplus \tilde{A}.$$

Утверждение 2-6. Пусть $\exists \tilde{A} : \mu_A \in F(R)$, что

$$R(\tilde{X}) \ominus_{\text{доп}} \tilde{A} \neq \emptyset \text{ и } Q(\tilde{X}) \ominus_{\text{доп}} \tilde{A} \neq \emptyset.$$

Тогда $R(\tilde{X}) = Q(\tilde{X}) \Leftrightarrow R(\tilde{X}) \ominus_{\text{доп}} \tilde{A} = Q(\tilde{X}) \ominus_{\text{доп}} \tilde{A}.$

Утверждение 2-7. $\forall \tilde{A} : \mu_A \in F(R)$

$$R(\tilde{X}) = Q(\tilde{X}) \Leftrightarrow R(\tilde{X}) \otimes_{\text{доп}} \tilde{A} = Q(\tilde{X}) \otimes_{\text{доп}} \tilde{A}.$$

Утверждение 2-8. Пусть $\exists \tilde{A} : \mu_A \in F(R)$, что

$$R(\tilde{X}) \ominus_{\text{доп}} \tilde{A} \neq \emptyset \text{ и } Q(\tilde{X}) \ominus_{\text{доп}} \tilde{A} \neq \emptyset.$$

Тогда $R(\tilde{X}) = Q(\tilde{X}) \Leftrightarrow R(\tilde{X}) \ominus_{\text{доп}} \tilde{A} = Q(\tilde{X}) \ominus_{\text{доп}} \tilde{A}.$

Утверждение 2-9. Пусть $\forall \tilde{X} : \mu_X \in F(R)$, $R(\tilde{X}) = T(\tilde{X}).$

Тогда $R(\tilde{X}) = Q(\tilde{X}) \Leftrightarrow T(\tilde{X}) = Q(\tilde{X}).$

Справедливость утверждений 2-3 и 2-4 доказывается тривиально и основана на определении дополнительной арифметической операции (2.48).

Доказательство справедливости утверждений 2-5, 2-6, 2-7, 2-8 и 2-9 похоже, поэтому докажем, например, утверждение 2-5.

Доказательство. Пусть \tilde{X}_1 – решение уравнения $R(\tilde{X}) = Q(\tilde{X}).$

Тогда $R(\tilde{X}) = Q(\tilde{X}) \Leftrightarrow R(\tilde{X}_1) = Q(\tilde{X}_1).$

По (2.44)

$$R(\tilde{X}_1) = Q(\tilde{X}_1) \Leftrightarrow R(\tilde{X}_1) \oplus \tilde{A} \ominus_{\text{доп}} \tilde{A} = Q(\tilde{X}_1).$$

Согласно утверждению 2-3

$$R(\tilde{X}_1) \oplus \tilde{A} \ominus_{\text{don}} \tilde{A} = Q(\tilde{X}_1) \Leftrightarrow R(\tilde{X}_1) \oplus \tilde{A} = Q(\tilde{X}_1) \oplus \tilde{A}.$$

Отсюда следует, что $R(\tilde{X}_1) \oplus \tilde{A} = Q(\tilde{X}_1) \oplus \tilde{A}$ при $\tilde{X} = \tilde{X}_1$.

Покажем обратное. Пусть \tilde{X}_2 – решение уравнения

$$R(\tilde{X}) \oplus \tilde{A} = Q(\tilde{X}) \oplus \tilde{A}.$$

Тогда \tilde{X}_2 будет решением уравнения $R(\tilde{X}) = Q(\tilde{X})$.

С учетом (2.56)

$$R(\tilde{X}_2) \oplus \tilde{A} = Q(\tilde{X}_2) \oplus \tilde{A} \Leftrightarrow R(\tilde{X}_2) = Q(\tilde{X}_2).$$

Отсюда следует, что

$$R(\tilde{X}) = Q(\tilde{X}) \text{ при } \tilde{X} = \tilde{X}_2.$$

Из доказанного вытекает, что если

$$R(\tilde{X}) = Q(\tilde{X}) \text{ при } \tilde{X} \in \emptyset, \text{ то и}$$

$$R(\tilde{X}) \oplus \tilde{A} = Q(\tilde{X}) \oplus \tilde{A} \text{ при } \tilde{X} \in \emptyset.$$

Действительно, предположим, что

$$R(\tilde{X}) = Q(\tilde{X}) \text{ при } \tilde{X} \in \emptyset, \text{ а}$$

$$R(\tilde{X}) \oplus \tilde{A} \neq Q(\tilde{X}) \oplus \tilde{A} \text{ при } \tilde{X} = \tilde{X}_2.$$

Из условия и по доказанному выше

$$R(\tilde{X}) = Q(\tilde{X}) \text{ при } \tilde{X} = \tilde{X}_2,$$

что противоречит предположению. Следовательно, если

$$R(\tilde{X}) = Q(\tilde{X}) \text{ при } \tilde{X} \in \emptyset, \text{ то и}$$

$$R(\tilde{X}) \oplus \tilde{A} = Q(\tilde{X}) \oplus \tilde{A} \text{ при } \tilde{X} \in \emptyset.$$

Аналогично показывается, что если

$$R(\tilde{X}) \oplus \tilde{A} = Q(\tilde{X}) \oplus \tilde{A} \text{ при } \tilde{X} \in \emptyset, \text{ то и}$$

$$R(\tilde{X}) = Q(\tilde{X}) \text{ при } \tilde{X} \in \emptyset.$$

Итак, показано, что

$$R(\tilde{X}) = Q(\tilde{X}) \Leftrightarrow R(\tilde{X}) \oplus \tilde{A} = Q(\tilde{X}) \oplus \tilde{A}.$$

Тем самым утверждение 2-5 доказано полностью.

Ниже приведем некоторые примеры решения нечетких уравнений [243] с помощью введенных выше дополнительных арифметических операций и равносильных переходов [242] для дальнейшего использования в процессе работы с экспертными знаниями.

2.3.2 Метод решений нечетких уравнений с использованием дополнительных арифметических операций

Рассмотрим уравнение вида

$$A \otimes X \oplus B = C, \quad (A \neq 0). \quad (2.66)$$

На основании утверждения 2-6 (2.65) равносильно нечеткому уравнению

$$A \otimes X \oplus B \Theta_{\text{доп}} B = C \Theta_{\text{доп}} B \Leftrightarrow A \otimes X = C \Theta_{\text{доп}} B. \quad (2.67)$$

Поскольку нечеткое число A не равно четкому нулю, то на основании утверждения 2-8 нечеткое уравнение (2.66) равносильно уравнению

$$X = (C \Theta_{\text{доп}} B) \ominus_{\text{доп}} A. \quad (2.68)$$

Уравнение (2.67) имеет единственный корень – нечеткое число

$$(C \Theta_{\text{доп}} B) \ominus_{\text{доп}} A.$$

Так как уравнение (2.65) равносильно нечеткому уравнению (2.68), то (2.66) имеет также единственный корень – число.

Решение нечетких уравнений второй степени.

Рассмотрим уравнение вида

$$A \otimes X^2 \oplus B \otimes X \oplus C = 0, \quad (A \neq 0). \quad (2.69)$$

Следует отметить, что уравнение в виде (2.69) не может иметь точного решения в связи с требованием равенства нечеткости в левой и правой частях указанного выражения, которое в данном случае не выполняется.

Поэтому возможно точное решение нечетких уравнений одного из следующих видов

$$A \otimes X^2 = 0 \Theta_{\text{доп}} B \otimes X \Theta_{\text{доп}} C \quad (A \neq 0); \quad (2.70 \text{ a})$$

$$A \otimes X^2 \oplus B \otimes X = \Theta_{\text{доп}} C \quad (A \neq 0); \quad (2.70 \text{ b})$$

$$A \otimes X^2 \oplus C = \Theta_{\text{доп}} B \otimes X \quad (A \neq 0). \quad (2.70 \text{ c})$$

Для примера покажем решение (2.69b).

На основании утверждения 2-3 (2.69b) примет вид

$$A \otimes X^2 \oplus B \otimes X \oplus_{\text{дон}} C = 0 \quad (A \neq 0). \quad (2.71)$$

Дальнейшее преобразование (2.69b) затруднено из-за выполнения для нечетких чисел закона дистрибутивности в ослабленной форме. Для преодоления указанного недостатка представим (2.70) системой уравнений для каждого параметра нечеткого числа. Согласно (2.37), (2.39), (2.62) она примет вид

$$\begin{cases} ax^2 + bx + c = 0 \\ \Delta(X)(2ax + b) + x(x\Delta(A) + \Delta(B)) - \Delta(C) = 0 \\ d(X)(|2ax| + |b|) + x^2 d(A) + |x|d(B) - d(C) = 0. \end{cases} \quad (2.72)$$

Проведя дальнейшее преобразование, для точного решения параметров нечеткой переменной x получим:

$$\begin{cases} x = \frac{-b \pm \sqrt{D}}{2a} \\ \Delta(X) = \frac{\Delta(C) - x(x\Delta(A) + \Delta(B))}{2ax + b} \\ d(X) = \frac{d(C) - (x^2 d(A) + |x|d(B))}{|2ax| + |b|} \end{cases} . \quad (2.73)$$

Так как число уравнений равно числу неизвестных параметров, то (2.73) имеет решение.

Решение (2.73) существует при выполнении условия, что дискриминант

$$D \geq 0. \quad (2.74)$$

Для других видов нечетких квадратных уравнений решение определяется аналогично. Таким образом, предложенные дополнительные арифметические операции над нечеткими числами и введенные тождественные преобразования делают возможным точное решение нечетких уравнений, что важно в рамках решаемой в диссертации проблемы в целом.

ВЫВОДЫ ПО 2 ГЛАВЕ

1. Исследование общепринятых форм представления нечетких чисел (LR)-типа и расширенных арифметических операций над ними показало их недостаточность для анализа и оценивания состояния СЛО, связанную с зависимостью выбора формы представления указанных операций от знака

нечеткого числа. Это привело к необходимости нового представления параметров нечетких чисел (LR)-типа в симметризованной форме, что позволило ввести новые унифицированные формы записи расширенных арифметических операций, не чувствительных к знаку нечеткого числа.

2. Введение симметризованной формы представления параметров нечеткого числа (LR)-типа повлекло за собой необходимость разработки методов решения нечетких уравнений, для чего на базе предложенных форм записи расширенных арифметических операций и с учетом существующих возможностей современных методов символьной математики были предложены дополнительные арифметические операции, позволяющие при их применении компенсировать увеличение степени нечеткости (ее “расползание”) с сохранением ее первоначального значения в знакопередающих рядах нечетких чисел (LR)-типа. Доказана тождественность преобразований при введенной форме представления параметров нечетких чисел (LR)-типа.

3. Разработаны теоретические основы получения четких решений нечетких уравнений. Для этого были использованы дополнительные арифметические операции над нечеткими числами (LR)-типа в симметризованной форме, исследованы их свойства и доказана их применимость в рамках поставленной проблемы. Полученные результаты необходимы при решении многих задач диссертационного исследования, что будет продемонстрировано в последующих главах.

4. Проведенные фундаментальные исследования по выбору и обоснованию новых форм представления нечетких чисел и арифметических операций над ними заложили основу для практического использования лингвистических переменных, позволяющих в конструктивном виде представлять экспертную информацию в доступном для дальнейшей обработки виде. В отличие от общепринятых, введенные дополнительные арифметические операции, которые позволяют сохранить первоначальную нечеткость, что особенно важно при работе с знакопеременными последовательностями нечетких чисел (LR)-типа для решения поставленной проблемы в целом.

ГЛАВА 3. МЕТОД ФОРМАЛИЗОВАННОГО ОПИСАНИЯ ЭКСПЕРТНЫХ ЗНАНИЙ В ПРОСТРАНСТВЕ ЛИНГВИСТИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ

Процедуры извлечения, представления и формализации экспертной информации, согласно ранее введенным определениям (см. глава 1), требуют наличия соответствующих методов и методик «упаковки» (интеграции) определенного объема знаний в виде некоторых моделей. Поскольку Сло функционируют в многомерных пространствах состояний, описываемых нечеткими переменными различной физической природы, то процедура оценивания их состояния должна, с одной стороны, отражать особенности Сло, а с другой – давать возможность обобщения знаний об этих объектах [224, 259].

Поэтому существующее научно-методическое обеспечение извлечения, представления и формализации знаний и опыта эксперта для оценивания состояния Сло в условиях существенной неопределенности нуждается в дальнейшем совершенствовании.

Выдвинутая (см. глава 1, п.1.4.1) принципиально новая *концепция оценивания состояния Сло в многомерном пространстве нечетких переменных в виде аналитического выражения (в общем случае, аналитических выражений)* реализуется далее на основе формализации явных и неявных экспертных знаний, где сам эксперт выступает как «интеллектуальная информационно-измерительная и диагностическая система» [239].

Поскольку речь идет о многомерных пространствах нечетких переменных, а общая топология в рамках структурно-математического подхода примыкает к теории множеств и призвана конструктивно использовать такие ее базовые понятия как «непрерывность», «метрика» и т.п., то актуальными становятся задачи формирования нечетких топологических пространств параметров состояния, а для оценивания агрегированного состояния Сло – задачи введение и использования нечеткой метрики в этих многомерных топологических пространствах. Такие процедуры переводят исследования задач оценивания состояния Сло в область

метрических нечетких многомерных пространств, что полностью соответствует новому перспективному направлению исследований, рассматриваемому в данной диссертации и связанному с получением количественных характеристик состояния СЛО на основе качественных данных, формируемых экспертами [76,77,223].

В данной главе изложены результаты теоретических исследований, доказывающих возможность реализации выдвинутой концепции.

3.1 ПРИМЕНЕНИЕ (LR)-АППРОКСИМАЦИИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ АЛГОРИТМОВ НЕЧЕТКОГО ВЫВОДА

При разработке методов формализации нечеткой информации важную роль играет выбор процедур нечеткого логического вывода с использованием лингвистических переменных. В [322] показано, что при использовании лингвистических переменных для построения нечетких моделей сложных технических систем возникают два препятствия: проблема замкнутости или выводимости терм-множеств и комбинаторный взрыв, связанный со сложностью вычислений характеристик нечетких множеств, соответствующих порождающим термам лингвистической переменной.

Сказанное выше значительно усложняет реализацию нечеткого логического вывода на ЭВМ. В связи с этим возникает задача анализа и синтеза процедур аппроксимации, упрощающих реализацию алгоритмов нечеткого вывода.

Ниже рассматриваются процедуры, позволяющие обойти сформулированные выше препятствия [27,247,259]. Это позволит перейти от выражений в терминах функций принадлежности к выражениям с аргументами (LR)-функций [3].

При построении нечетких моделей для оценивания состояния СЛО задача представления нечеткой информации решается с использованием лингвистических переменных.

Понятие лингвистической переменной было введено в [86, 325].

Определение 3-1. Лингвистическая переменная характеризуется кортежем:

$$\langle S, T(S), X, M, G \rangle,$$

где S – название лингвистической переменной;

$T(S)$ – терм-множество лингвистической переменной S , представляющее собой семейство нечетких подмножеств X .

X – базовое множество значений переменной;

M – правила вычисления функции принадлежности составного значения по значениям $T(S)$;

G – синтаксическое правило (имеющее обычно форму грамматики), порождающее совокупность всех значений S на $T(S)$.

Следует отметить, что лингвистической называется переменная, заданная на некоторой количественной шкале и принимающая значения, являющиеся словами и словосочетаниями естественного языка.

Решение задач математического моделирования для оценивания его состояния Сло связано с созданием эффективных вычислительных процедур. Наличие лингвистических переменных существенно ограничивает построение алгоритмов нечеткого вывода. В связи с этим данную частную вычислительную проблему можно сформулировать следующим образом.

Пусть даны: терм-множество L , логический оператор τ и l – множество, полученное применением τ к L . Допустим, что на L задана мера сходства между термами. Тогда в случае $l \notin L$ требуется найти такое $l' \in L$, что мера сходства между l и l' будет максимальной.

Свойства унимодальности и нормальности нечетких подмножеств позволяют использовать их аппроксимацию с помощью (LR) -функций.

Основная идея (LR) -аппроксимации заключается в переходе от выражений в терминах функций принадлежности к выражениям с аргументами (LR) -функций с целью получения аналитических решений различных задач.

Как указано в [3], для осуществления (LR) -аппроксимации необходимо сделать переход к двойственной задаче, а затем, получив решение в терминах аргументов (LR) -функций, произвести обратный переход. Возможность такого перехода базируется на следующем утверждении:

Утверждение 3-1 [3]. Пусть $L(x)$ – функция (LR) -типа, $x \in \mathbb{R}^+$;

$L^{-1}(y)$ – обратная функция $y \in [0,1]=E$, $R' = \{x | \exists y \in E (L^{-1}(y) = x)\}$,
 $E' = \{y | \exists x \in R (L(x) = y)\}$. Тогда дистрибутивная структура $Q_E = \langle E', \wedge, \vee \rangle$ является
 антиизоморфной структуре $Q_R = \langle R', \wedge, \vee \rangle$.

Здесь используется доказательство от противного в нечетком случае.

Следствие 3-1. Для любой формулы S , образованной из элементов множества E' и операций \vee и \wedge , существует двойственная формула S^* , образующаяся из элементов множества R' и операций \vee и \wedge .

При условии нахождения возможностной меры сходства применение (LR)-аппроксимации дает возможность получения аналитического решения. При этом справедливо следующее утверждение.

Утверждение 3-2. Пусть $a, b \in U$; U – множество значений лингвистической переменной, которому соответствует множество нечетких чисел A и B (LR)-типа. Тогда мера возможности того, что понятие « a есть b » [81], определяется из (2.25) и будет равно:

$$Pos(a = b) = \max(0, \min(1, 1 + \frac{a-b}{\beta+\gamma}, 1 + \frac{b-a}{\alpha+\delta})). \quad (3.1)$$

Решение задачи приближения функций принадлежности μ функциями (LR)-типа сводится к выбору одной из функций L^* (LR)-типа из заданного множества, для которой мера отличия $\rho(\mu, L^*)$ минимальна. В случае выбора метрики Минковского [92] как меры отличия решается задача математического программирования: следующего вида

$$w^* = \text{Arg min}_w \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\mu(x_i) - L(\frac{a-x_i}{\alpha})]^r \right)^{\frac{1}{r}}, \quad (3.2)$$

где $w=(a, \alpha) \in R \times R^+$; a, α – параметры (LR)-функции; $x_i \in X \subset R$; n – количество точек.

Применение метрики Минковского дает возможность выбирать различные меры отличия $\mu(x_i)$ от $L(\frac{a-x_i}{\alpha})$ в зависимости от r с учетом формы функций принадлежности (LR)-типа [3].

Таким образом, вычисление функций принадлежности μ'_B можно осуществить, используя аналитические выражения для аргументов (LR)-функций. Это дает возможность перехода от выражений в терминах функций принадлежности к выражениям с аргументами (LR)-функций.

3.2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕЧЕТКОЙ МЕТРИКИ НА МНОЖЕСТВЕ НЕЧЕТКИХ ЧИСЕЛ (LR)-ТИПА

3.2.1 Развитие понятия нечеткого топологического пространства

Развитие теории нечетких множеств стимулировало создание нечетких аналогов тех или иных математических теорий. Общая топология явилась одной из первых областей теоретической математики, где нечеткие множества стали рассматриваться в качестве элементов нечетких топологических пространств. Еще в 1968 году, то есть спустя лишь три года после опубликования первой работы Заде [303], Чангом [279] было предложено следующее определение нечеткого топологического пространства (НТП).

Определение 3-2. Семейство T нечетких множеств в $F(R)$ называется нечеткой топологией τ , если выполняются следующие свойства:

1. $F(R) \in \tau, \emptyset \in \tau$.
2. $\bigcup_i A_i \in \tau$ для любого семейства нечетких множеств в $F(R)$, таких что для всех $i = \overline{1, n}$ $A_i \in \tau$.
3. $\bigcap_i A_i \in \tau$ для любого семейства нечетких множеств в $F(R)$, таких что для всех $i = \overline{1, n}$ $A_i \in \tau$.

Множество $F(R)$ с введенной в нем топологией τ называется нечетким топологическим пространством и обозначается $(F(R), \tau)$. Элементы семейства τ

называются открытыми нечеткими множествами. Нечеткое множество, являющееся дополнением в $F(R)$ к открытому нечеткому множеству, называется замкнутым.

За работой [279] последовали другие подходы к определению нечеткого топологического пространства, предложенные Гогеном [287], Ловеном [304,305] и другими авторами. В работах [164,279,292,293,297,298,322,323] показано, что нечеткие топологические пространства обладают своеобразными свойствами, которых нет в обычных топологических пространствах.

Учитывая, что большинство работ в области нечеткой топологии основываются на определении Чанга, в дальнейшем под термином «нечеткое топологическое пространство» будем понимать чанговское нечеткое топологическое пространство в смысле определения 3-2.

Важным классом нечетких топологических пространств являются *нечеткие метрические пространства* (НМП), которые представляют особый интерес для решения проблемы оценивания состояния СЛО. В нечеткой топологии имеется несколько точек зрения на понятие метрики. Условно их можно разбить на две основные группы [274].

Первую группу составляют работы [280,286,288], в которых метрика рассматривается как числовое расстояние между нечеткими объектами. Ко второй группе относятся работы [285,290,291], в которых нечеткими являются расстояния между объектами, при этом сами объекты могут быть четкими или (реже) нечеткими. Указанный подход основывается на понятии «нечеткой интервальной прямой» [285].

Определение 3-3. Под «нечеткой интервальной прямой» $F(R)$ будем понимать $F(R) = \{X, \mu \mid \mu: R \rightarrow [0,1], X \in R\}$ – совокупность нечетких множеств числовой оси (нечетких чисел).

Определение 3-3 является ключевым в понимании нечеткой метрики [274].

Определение 3-4. Нечеткой метрикой на множестве X называется отображение $q: X \times X \rightarrow F(R)$, где $F(R)$ – нечеткая интервальная прямая, удовлетворяющее аксиомам:

- (1) $q(x, y) = 0$ тогда и только тогда, когда $x = y$;
- (2) $q(x, y) = q(y, x)$;
- (3) $q(x, z) < q(x, y) + q(y, z)$, $x, y, z \in X$.

Нечеткое число $q(x, y)$ при этом трактуется как «возможность» [327] того, что расстояние между x и y равно q . Пара (X, q) называется нечетким метрическим пространством. Применяя так называемый метод поуровневого представления нечетких чисел, Эклунд и Гелер [285] определяют нечеткую метрику q на самой интервальной прямой $F(R)$. Однако там же указано, что равенство модулей $|\tilde{0}, \acute{0} - \tilde{0}| = |\tilde{0}, \acute{0}|$ не имеет места, на основании чего в [274] сделан вывод о невозможности определения метрики посредством «нечеткой нормы».

Ниже покажем, что для множества нечетких чисел (LR)-типа введение нечеткой метрики возможно.

3.2.2 Задание нечеткой метрики на множестве нечетких чисел (LR)-типа

Исследуем понятие модуля нечеткого числа. Введем соответствующие определения [77,255,259].

Определение 3-5. При параметрическом представлении нечеткого числа его нечеткий модуль определяется как нечеткое число

$$|A| = \begin{cases} (|a|, \alpha, \beta), a \geq 0 \\ (|a|, \beta, \alpha), a < 0 \end{cases} \quad (3.5)$$

Определение 3-6. Будем говорить, что нечеткая функция $Q: F(X) \rightarrow F(R)$ задает нечеткую норму, если выполняются следующие аксиомы:

$$1. Pos (Q(A) \geq \tilde{0}) = 1, \text{ т.е. } \forall A \in F(X), \arg \max \mu_{|A|}(x) \geq 0. \quad (3.6)$$

$$2. Pos (|\lambda \otimes Q(A)| = \lambda \otimes |Q(A)|) = 1, \forall A \in F(X), \lambda \in R. \quad (3.7)$$

$$3. Pos (|Q(B) \oplus Q(A)| \leq |Q(B)| \oplus |Q(A)|) = 1 \quad \forall A, B \in F(X). \quad (3.8)$$

Теорема 3-1. Нечеткий модуль $|A|$ является нечеткой нормой.

Доказательство. Доказательство очевидно и сводится к проверке аксиом (3.6)-(3.8), которые в этом случае записываются в следующем виде:

$$1. Pos(|A| \geq \tilde{0}) = 1, \text{ т.е. } \operatorname{argmax} \mu_{|A|}(x) \geq 0.$$

$$2. Pos(|\lambda \otimes A| = \lambda \otimes |A|) = 1, \forall A \in F(X), \lambda \in R.$$

$$3. Pos(|B \oplus A| \leq |B| \oplus |A|) = 1, \forall A, B \in F(X).$$

Введем понятие расстояния на множестве НЧ.

Определение 3-7. Будем говорить, что нечеткая функция $q: F(X) \times F(X) \rightarrow F(R)$ задает нечеткую метрику, если выполняются следующие аксиомы:

$$1. Pos(q(A, B) \geq \tilde{0}) = 1. \text{ Нечеткая метрика неотрицательна, то есть}$$

$$\operatorname{argmax} \mu(q(A, B)) \geq 0. \quad (3.9)$$

$$2. q(A, B) = \tilde{0} \Leftrightarrow Pos(A = B) = 1 \quad (3.10)$$

$$3. q(A, B) = q(B, A). \quad (3.11)$$

$$4. Pos(q(A, C) \leq q(A, B) \oplus q(B, C)) = 1. \quad (3.12)$$

Введем понятие нечеткого расстояния между нечеткими числами (LR)-типа.

Определение 3-8. Нечеткое расстояние $\tilde{q}(A, B)$ между двумя нечеткими числами A и B такими, что $A = (a, \alpha, \beta)$, $B = (b, \gamma, \delta) \in F(R)$, определяется равенствами:

$$a) \forall A, B: \mu_A, \mu_B \in F(R^+), a \geq 0, b \geq 0,$$

$$\tilde{q}(A, B) = (|a - b|, |\alpha - \gamma|, |\beta - \delta|). \quad (3.13a)$$

$$b) \forall A, B: \mu_A, \mu_B \in F(R^+), a \geq 0, b < 0,$$

$$\tilde{q}(A, B) = (|a - b|, |\alpha - \delta|, |\beta - \gamma|). \quad (3.13b)$$

$$c) \forall A, B: \mu_A, \mu_B \in F(R^+), a < 0, b < 0,$$

$$\tilde{q}(A, B) = (|a - b|, |\beta - \delta|, |\alpha - \gamma|). \quad (3.13c)$$

Теорема 3-2. Нечеткое расстояние $\tilde{q}(A, B)$ задает на $F(R)$ нечеткую метрику.

Доказательство. Проверим соответствие нечеткого расстояния аксиомам (3.9) – (3.12).

$$1. Pos(\tilde{q}(A, B) \geq \tilde{0}) = 1.$$

Из (2.27)

$$Pos(\tilde{q}(A, B) \geq \tilde{0}) = \max(0, \min(1, 1 + \frac{|a-b|}{|\beta-\delta|+|\alpha-\gamma|})).$$

По свойству модуля действительного числа

$$\frac{|a-b|}{|\beta-\delta|+|\alpha-\gamma|} \geq 0 \Rightarrow Pos(\tilde{q}(A, B) \geq \tilde{0}) = 1$$

$$2. \tilde{q}(A, B) = \tilde{0} \Leftrightarrow Pos(A=B) = 1, \text{ аксиома тождества.}$$

Пусть $\exists A = (a, \alpha, \beta)$ и $\exists B = (b, \gamma, \delta)$, что $\tilde{q}(A, B) = \tilde{0}$.

По определению 3-8 $\tilde{q}(A, B) = \tilde{0} \Leftrightarrow a = b$.

Из (2.25), (2.27), (2.30) $Pos(A=B) = 1 \Leftrightarrow a = b$.

Отсюда $\tilde{q}(A, B) = \tilde{0} \Leftrightarrow Pos(A=B) = 1$.

$$3. \tilde{q}(A, B) = \tilde{q}(B, A), \text{ (аксиома симметрии).}$$

Выполнение этой аксиомы очевидно:

$$\forall A, B: \mu_A, \mu_B \in F(R^+), a \geq 0, b \geq 0,$$

$$\tilde{q}(A, B) = (|a-b|, |\alpha-\gamma|, |\beta-\delta|) = (|b-a|, |\gamma-\alpha|, |\delta-\beta|) = \tilde{q}(B, A).$$

$$4. Pos(\tilde{q}(A, C) \leq \tilde{q}(A, B) \oplus \tilde{q}(B, C)) = 1, \text{ аксиома треугольника.}$$

Выполнение этой аксиомы проверяется следующим образом:

$$\tilde{q}(A, B) \oplus \tilde{q}(B, C) = (|a-b|, |\alpha-\gamma|, |\beta-\delta|) \oplus (|b-c|, |\gamma-\lambda|, |\delta-\theta|) = (|a-b|+|b-c|, |\alpha-\gamma|+|\gamma-\lambda|, |\beta-\delta|+|\delta-\theta|). \quad \oplus$$

$$(|a-b|+|b-c|, |\alpha-\gamma|+|\gamma-\lambda|, |\beta-\delta|+|\delta-\theta|) = (|a-b|+|b-c|, |\alpha-\gamma|+|\gamma-\lambda|, |\beta-\delta|+|\delta-\theta|).$$

Из (2.27)

$$Pos(\tilde{q}(A, C) \leq \tilde{q}(A, B) \oplus \tilde{q}(B, C)) = \min(1, 1 + \frac{|a-b|+|b-c|+|a-c|}{|\beta-\delta|+|\delta-\theta|+|\alpha-\lambda|}).$$

По свойству модуля действительного числа

$$|a-b|+|b-c| \geq |a-c| \Leftrightarrow \frac{|a-b|+|b-c|+|a-c|}{|\beta-\delta|+|\delta-\theta|+|\alpha-\lambda|} \geq 0 =$$

$$= \text{Pos}(\tilde{q}(A,C) \leq \tilde{q}(A,B) \oplus \tilde{q}(B,C)) = 1.$$

Что и требовалось доказать.

Для задания нечеткой метрики на множестве нечетких чисел (LR)-типа посредством нечеткой нормы докажем следующую теорему.

Теорема 3-3. $\forall A: \mu_A \in F(\mathbb{R}), \tilde{q}(A,0) \Leftrightarrow |A|.$

Доказательство. $\tilde{q}(A,0) = (|a-0|, |\beta-0|, |\alpha-0|).$

Из определения нечеткого числа (LR)-типа

$$\alpha > 0, \beta > 0 \Rightarrow \tilde{q}(A,0) = (|a-0|, |\beta-0|, |\alpha-0|) = (|a|, \alpha, \beta) = |A|.$$

Покажем обратное: $|A| = (|a|, \alpha, \beta).$

По (2.54)

$$|A| \underset{\text{äi}}{\ominus} 0 = |A| \Leftrightarrow (|a|-0, |\beta|-0, |\alpha|-0) \Leftrightarrow \tilde{q}(A,0) = (|a-0|, |\beta-0|, |\alpha-0|).$$

Отсюда $\tilde{q}(A,0) \Leftrightarrow |A|.$

Что и требовалось доказать.

Следствие 3-2. Нечеткая метрика может быть введена посредством нечеткой нормы на множестве нечетких чисел (LR)-типа.

Учитывая введенное симметризованное параметрическое представление нечетких чисел (2.33), (2.34), формулы (3.13а) – (3.13с) будут:

$$\forall A, B: \mu_A, \mu_B \in F(\mathbb{R}),$$

$$d(A, B) = d(A) - d(B), \quad \Delta(A, B) = \Delta(A) - \Delta(B), \quad (3.14)$$

$$\tilde{q}(A, B) = (|a-b|, |d(A, B) - \Delta(A, B)|, |d(A, B) + \Delta(A, B)|). \quad (3.15)$$

Отсюда следует, что задание нечеткой метрики посредством «нечеткой нормы» для множества нечетких чисел (LR)-типа возможно.

Поскольку Сло функционирует в многомерном пространстве состояний, описываемых четкими и нечеткими переменными, то его состояния определяются значениями параметров, характеризующих элементы (точки) этого пространства, и

для оценки различия состояний СЛО необходимы соответствующие критерии, разработка которых требует метризации этих пространств. Симметризованное представление нечетких чисел (LR)-типа дает унифицированную форму нахождения нечеткого расстояния между нечеткими числами.

3.3 ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НЕЧЕТКИХ МЕТРИЧЕСКИХ ПРОСТРАНСТВ НА МНОЖЕСТВЕ НЕЧЕТКИХ ПОДМНОЖЕСТВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПОСТРОЕНИЮ НЕЧЕТКИХ МОДЕЛЕЙ

Дадим определение нечеткого метрического пространства.

Определение 3-9. Множество $F(R)$ с введенной на нем нечеткой метрикой \tilde{q} называется нечетким метрическим пространством и обозначается $(F(R), \tilde{q})$.

Определение 3-10.

Пусть задано два подмножества нечетких чисел M и N , таких что $\exists X \in M$, $\exists Y \in N$, для которых $\text{Pos}(0 = \tilde{q}(X, Y)) > 0$. Тогда расстоянием между двумя подмножествами нечетких чисел M и N в метрическом пространстве $(F(R), \tilde{q})$ называется неотрицательное НЧ, определяемое как

$$\tilde{q}(M, N) = \text{Arg} \max_{\substack{\forall X \in M \\ \forall Y \in N}} \text{Pos}(q(X, Y) = 0) > 0, \quad (3.16)$$

где X и Y пробегает все значения M и N соответственно.

Определение 3-11. Пусть A – произвольное нечеткое число, а M – подмножество нечетких чисел, таких что $A \in F(R)$ и $M \subset F(R)$. Будем считать, что $A \in M$, если $\tilde{q}(A, M) = \tilde{0}$.

В частности, если одно из множеств, например M , состоит лишь из одного нечеткого числа A , то мы получаем нечеткое расстояние $\tilde{q}(A, N)$ от нечеткого числа A до множества N , определяемое по следующей формуле:

$$\tilde{q}(A, N) = \text{Arg} \max_{\forall Y \in N} \text{Pos}(\tilde{q}(A, Y) = 0) > 0, \tilde{}$$

где Y пробегает все значения N .

Примером множеств нечетких чисел могут служить трапецеидальные нечеткие числа.

Следует отметить, что введенная выше метрика имеет смысл только при параметрическом представлении нечетких чисел, предложенном в [81,280]. Если применить (3.13) к действительным числам, то оно сведется к обычному расстоянию $\tilde{q}((a,0,0),(b,0,0)) = |a - b|$.

Предложенная нечеткая метрика является для $F(R)$ хаусдорфовой метрикой и задает на множестве нечетких чисел метрическое пространство, называемое нечеткой числовой прямой.

Докажем теперь некоторые свойства, связанные с введенной на $F(R)$ метрикой.

Теорема 3-4. Пусть $A = (a, \alpha_a, \beta_a)$, $B = (b, \alpha_b, \beta_b)$, $C = (c, \alpha_c, \beta_c)$ и

$D = (d, \alpha_d, \beta_d) \in F(R)$. Тогда

$$\tilde{q}(A \oplus B, A \oplus C) = \tilde{q}(B, C), \quad (3.17)$$

$$Pos(\tilde{q}(A \oplus B, C \oplus D) \leq \tilde{q}(A, C) \oplus \tilde{q}(B, D)) = 1 \quad (3.18)$$

Доказательство.

Докажем равенство (3.17):

из определения нечеткой метрики следует

$$\tilde{q}(A \oplus B, A \oplus C) =$$

$$\tilde{q}(((a+b), (\alpha_a + \alpha_b), (\beta_a + \beta_b)), ((a+c), (\alpha_a + \alpha_c), (\beta_a + \beta_c))),$$

$$\tilde{q}(A \oplus B, A \oplus C) = (|a+b-a-c|, |\alpha_a + \alpha_b - \alpha_a - \alpha_c|, |\beta_a + \beta_b - \beta_a - \beta_c|)$$

$$= (|b-c|, |\alpha_b - \alpha_c|, |\beta_b - \beta_c|) = \tilde{q}(B, C).$$

Докажем равенство (3.18):

по (3.17), (2.16), (3.12)

$$\tilde{q}(A, C) \oplus \tilde{q}(B, D) = \tilde{q}(A \oplus C, B \oplus C) \oplus \tilde{q}(C \oplus B, D \oplus B) =$$

$$= \tilde{q}(A \oplus C, C \oplus B) \oplus \tilde{q}(C \oplus B, D \oplus B) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Pos(\tilde{q}(A \oplus C, C \oplus B) \oplus \tilde{q}(C \oplus B, D \oplus B) \geq \tilde{q}(A \oplus B, C \oplus D)) = 1$$

$$\Leftrightarrow Pos(\tilde{q}(A \oplus B, C \oplus D) \leq \tilde{q}(A, C) \oplus \tilde{q}(B, D)) = 1. \quad (3.19)$$

Определение 3-12. Пусть $\tilde{\varepsilon}$ – какое-либо нечеткое число, а A – любое нечеткое число метрического пространства $F(R)$. Окрестностью с центром A и радиусом $\tilde{\varepsilon}$ называется множество всех нечетких чисел, таких что

$$\max(\text{Pos}(\tilde{q}(A, A') < \tilde{\varepsilon}), \text{Pos}(\tilde{q}(A, A') > \tilde{\varepsilon})) = \text{Pos}(\tilde{q}(A, A') < \tilde{\varepsilon})$$

и обозначается $\tilde{Q}(A, \tilde{\varepsilon})$.

Определение 3-13. Нечеткое число A из подмножества M метрического пространства $F(R)$ называется внутренним для подмножества M , если

$\exists \tilde{\varepsilon}$ - окрестность $\tilde{Q}(A, \tilde{\varepsilon})$, что

$$\tilde{Q}(A, \tilde{\varepsilon}) \cap M = \tilde{Q}(A, \tilde{\varepsilon}). \quad (3.20)$$

Докажем следующую теорему.

Теорема 3-5. Нечеткое метрическое пространство $(F(R), \tilde{q})$ является Чанговским нечетким топологическим пространством.

Доказательство. Проверим соответствие нечеткого метрического пространства $(F(R), \tilde{q})$ аксиомам определения Чанговского нечеткого топологического пространства, которые имеют вид:

$$1. F(R) \in \tau, \emptyset \in \tau.$$

2. $\bigcup_i A_i \in \tau$ для любого семейства нечетких множеств в $F(R)$, таких, что для всех $i = \overline{1, n}$ $A_i \in \tau$.

3. $\bigcap_i A_i \in \tau$ для любого семейства нечетких множеств в $F(R)$ таких, что для всех $i = \overline{1, n}$ $A_i \in \tau$.

Выполнение первой аксиомы очевидно.

Проверим выполнение аксиомы 2.

Пусть теперь $M = \bigcup_{i=1}^n M_i$, где $\forall M_i \in \tau$. Далее пусть A – произвольное нечеткое число из M . Тогда ясно, что найдется такое M_{i_0} , что $A \in M_{i_0}$ и существует $\tilde{\varepsilon}$ -окрестность A , содержащаяся в M_{i_0} , а следовательно и в M .

Для проверки выполнения аксиомы 3 предположим, что $M = \bigcap_{i=1}^n M_i$ где $\forall M_i \in \tau$. Тогда $\forall A \in M$ и $\forall i$ найдется окрестность $\tilde{O}(A, \tilde{\varepsilon})$, содержащаяся в M_i . Поэтому, положив $\tilde{\varepsilon} = \arg\max(Po\alpha(\tilde{\varepsilon} = 0))$, непосредственно убеждаемся, что $\tilde{O}(A, \tilde{\varepsilon})$ содержится в M , то есть A – внутреннее нечеткое число для M .

Что и требовалось доказать.

Определение 3-14. Пусть нечеткое n -мерное пространство, x – множество упорядоченных наборов (x_1, x_2, \dots, x_n) , составленное из n нечетких чисел. Нечеткое расстояние в нечетком n -мерном пространстве между $A = (A_1, A_2, \dots, A_n)$ и $B = (B_1, B_2, \dots, B_n)$ зададим по формулам:

$$\begin{aligned} \text{а) } \forall A, B: \mu_{A_i}, \mu_{B_i} \in F(R^+)^n, a_i \geq 0, b_i \geq 0, i = \overline{1, n} \\ \tilde{q}(A, B) = (\|a - b\|, \|\alpha - \gamma\|, \|\beta - \delta\|), \end{aligned} \quad (3.21a)$$

В математике под обозначением $\|\bullet\|$ обычно понимают норму, т.е. функцию, заданную на векторном пространстве и обобщающая понятие длины вектора.

$$\begin{aligned} \text{б) } \forall A, B: \mu_{A_i}, \mu_{B_i} \in F(R), a_i \geq 0, b_i < 0, i = \overline{1, n} \\ \tilde{q}(A, B) = (\|a - b\|, \|\alpha - \delta\|, \|\beta - \gamma\|) \end{aligned} \quad (3.21b)$$

$$\begin{aligned} \forall A, B: \mu_{A_i}, \mu_{B_i} \in F(R), a_i < 0, b_i < 0, i = \overline{1, n} \\ \text{с) } \tilde{q}(A, B) = (\|a - b\|, \|\beta - \delta\|, \|\alpha - \gamma\|). \end{aligned} \quad (3.21c)$$

Для симметризованного представления параметров нечеткого числа формулы (3.21) запишутся в виде:

$$\begin{aligned} \forall A, B: \mu_{A_i}, \mu_{B_i} \in F(R); -\infty < a_i < \infty, -\infty < b_i < \infty, i = \overline{1, n} \\ d_i(A, B) = d(A_i) - d(B_i), \Delta_i(A, B) = \Delta(A_i) - \Delta(B_i) \\ \tilde{q}(A, B) = (\|a_i - b_i\|, \|d_i(A, B) - \Delta(A, B)\|, \|d_i(A, B) + \Delta(A, B)\|). \end{aligned} \quad (3.22)$$

Теорема 3-6. Нечеткое расстояние $\tilde{q}(A, B)$ в нечетком n -мерном пространстве $F(R)^n$ задает на нем нечеткое n -мерное метрическое пространство $(F(R)^n, \tilde{q})$.

Доказательство. Проверим соответствие нечеткого расстояния $\tilde{q}(A, B)$ в нечетком n -мерном пространстве $F(R)^n$ аксиомам нечеткой метрики.

$$1. \text{Pos}(\tilde{q}(A, B) \geq \tilde{0}) = 1$$

Из (2.27)

$$\text{Pos}(\tilde{q}(A, B) \geq \tilde{0}) = \max(0, \min(1, 1 + \frac{\|a-b\|}{\|\beta-\delta\| + \|\alpha-\gamma\|})).$$

По аксиомам нормы в вещественном векторном пространстве

$$\frac{\|a-b\|}{\|\beta-\delta\| + \|\alpha-\gamma\|} \geq 0 \implies \text{Pos}(\tilde{q}(A, B) \geq \tilde{0}) = 1$$

$$2. \tilde{q}(A, B) = \tilde{0} \Leftrightarrow \text{Pos}(A=B) = 1 \text{ (аксиома тождества).}$$

Пусть $\exists A = (a, \alpha, \beta)$, $\exists B = (b, \gamma, \delta)$, что $\tilde{q}(A, B) = \tilde{0}$.

По определению 3-8 $\tilde{q}(A, B) = \tilde{0} \Leftrightarrow a=b$.

Из (2.25), (2.27), (2.30)

$$\text{Pos}(A=B) = 1 \Leftrightarrow a=b.$$

Отсюда $\tilde{q}(A, B) = \tilde{0} \Leftrightarrow \text{Pos}(A=B) = 1$.

$$3. \tilde{q}(A, B) = \tilde{q}(B, A) \text{ (аксиома симметрии)}$$

Выполнение этой аксиомы очевидно:

$$\forall A: \mu_A \in F(R^+), a \geq 0, b \geq 0$$

$$\tilde{q}(A, B) = (\|a-b\|, \|\alpha-\gamma\|, \|\beta-\delta\|) = (\|b-a\|, \|\gamma-\alpha\|, \|\delta-\beta\|) = \tilde{q}(B, A).$$

$$4. \text{Pos}(\tilde{q}(A, C) \leq \tilde{q}(A, B) \oplus \tilde{q}(B, C)) = 1 \text{ (аксиома треугольника).}$$

Выполнение этой аксиомы проверяется следующим образом:

$$\tilde{q}(A, B) \oplus \tilde{q}(B, C) = (\|a-b\|, \|\alpha-\gamma\|, \|\beta-\delta\|) \oplus$$

$$(\|b-c\|, \|\gamma-\lambda\|, \|\delta-\theta\|) = (\|a-b\| + \|b-c\|, \|\alpha-\gamma\| + \|\gamma-\lambda\|, \|\beta-\delta\| + \|\delta-\theta\|).$$

Из (2.27)

$$\text{Pos}(\tilde{q}(A, C) \leq \tilde{q}(A, B) \oplus$$

$$\tilde{q}(B, C)) = \min(1, 1 + \frac{\|a-b\| + \|b-c\| - \|a-c\|}{\|\beta-\delta\| + \|\delta-\theta\| + \|\alpha-\lambda\|}).$$

По свойству нормы вещественного векторного пространства

$$\|a-b\| + \|b-c\| \geq \|a-c\| \Leftrightarrow \frac{\|a-b\| + \|b-c\| - \|a-c\|}{\|\beta-\delta\| + \|\delta-\theta\| + \|\alpha-\lambda\|} \geq 0 =$$

$$Pos(\tilde{q}(A,C) \leq \tilde{q}(A,B) \oplus \tilde{q}(B,C)) = 1.$$

Что и требовалось доказать.

Резюмируя полученные результаты, следует отметить достигнутую цель, а именно построение нечетких многомерных метрических пространств, при этом нормой выступает модуль нечеткого числа.

Сформированные и структурированные в процессе наблюдения и эксплуатации СЛО в виде профессионального опыта экспертные знания о состоянии указанных объектов, согласно мнениям ученых [12,153,180,259], вполне корректно представлять нечеткими многомерными метрическими пространствами, что дает основания для использования при решении рассматриваемой в диссертации проблемы нечетко-возможностного подхода.

3.4 СИНТЕЗ ПРОЦЕДУР ПРЕДСТАВЛЕНИЯ НЕЧЕТКОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ФОРМАЛИЗАЦИИ ЭКСПЕРТНЫХ ЗНАНИЙ ПОЛИНОМИАЛЬНЫМИ МОДЕЛЯМИ

3.4.1 Представление экспертной информации нечеткими функциями в пространстве лингвистических переменных

Существует большое количество СЛО, для которых построение адекватных детерминированных математических моделей затруднено или невозможно. Это обусловлено сложностью самих объектов и слабостью теоретических разработок по определению природы связей в исследуемой системе. Несмотря на это, объекты успешно функционируют под наблюдением человека, осуществляющего выбор решения в необходимых случаях на основании неформализованной модели, существующей в его сознании [13-16,27,30,50,51,69,72,191,192,198-201,223,231,235,237,317,321].

Таким образом, при исследовании указанных объектов возникает необходимость учета неколичественной информации, которая зачастую является определяющей, хотя и не поддается точному описанию, то есть является нечеткой

по своей сути. В то же время, количественная информация такой нагрузки не несет [44,132,133,297-303]. Однако, если есть опытный эксперт, модель процесса уже создана и существует в его сознании. Остается эту модель представить в форме, удобной для реализации на ЭВМ [27,29,30,49-51,189,190,224,253,254,289]. Модель подобного типа, в сущности, является особой формой организации знаний эксперта, на основе которой производится семантическая идентификация нечетких категорий. Каждому нечеткому понятию ставится в соответствие нечеткое множество [1, 6, 85, 86, 99, 102, 117-120, 226] на соответствующей предметной шкале. Оно может быть также получено из имеющихся нечетких множеств выполнением некоторых специфических логических операций.

Это означает, что для обработки входной информации применяется нечеткая логика. Естественно, что для построения заключений в нечеткой логике должен использоваться некоторый аппарат логического вывода.

В настоящее время наиболее разработан композиционный метод вывода, предложенный в [85,325] и довольно успешно развиваемый в целом ряде работ [293-276,304-308,315,316]. Указанный метод использует для представления информации матрицы нечетких отношений. Количество этих матриц и их размеры довольно велики для реальных объектов, что существенно ограничивает применение данного метода.

В связи с этим возникает необходимость синтеза процедур представления нечеткой информации в моделях, *не использующих* матрицы нечетких отношений. Математической основой такого подхода может служить представление информации нечеткими функциями.

Дадим определение нечеткой функции. В основе этого определения лежит известный принцип обобщения Заде.

Определение 3-15 [283]. Пусть дана функция $F: F(R^n) \rightarrow F(R)$.

Значением нечеткой функции $F(X_1, X_2, \dots, X_n)$ от нечетких чисел $x_1 \dots x_n$ называется нечеткое множество с функцией принадлежности

$$\mu_F(t) = \begin{cases} \sup_{F(X_1, \dots, X_n) = t} \min \{ \mu_{X_1}(x_1), \dots, \mu_{X_n}(x_n) \} \\ 0, F^{-1}(t) = \emptyset \end{cases}.$$

При этом справедлива следующая теорема [60].

Теорема 3.7. Пусть $\phi(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – непрерывная функция, $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – значение нечеткой функции от нечетких чисел $X_1 \dots X_n$. Тогда $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ также нечеткое число. Очевидно, что если нечеткие переменные определены на множестве нечетких чисел и сама функция является непрерывной на нем, то она может быть задана с помощью алгебры нечетких чисел.

3.4.2 Определение параметров модели в нечеткой среде

Нечеткие числа, нечеткие переменные используются в различных моделях исследования операций, принятия решений, искусственного интеллекта, в которых с их помощью описываются коэффициенты целевых функций, оценки истинности высказываний, возможности реализации характеристик сложных систем и т. д. [3-5, 42-44, 76-78, 155, 170]. В связи с этим возникает задача вычисления нечетких функций от лингвистических переменных. При этом для задания лингвистической переменной необходимо выполнение соответствующих процедур по построению нечеткой оппозиционной шкалы как отражению экспертных знаний и состояния СЛО.

Лингвистические переменные и их значения служат для вербального (словесного, неколичественного) описания некоторой количественной величины. Поэтому принципиально важным является создание вербально - количественных шкал [6, 269] для всех лингвистических переменных факторного пространства.

Определение 3-16. Нечеткой лингвистической шкалой нечеткой лингвистической переменной S будем называть пару

$$(T(s), M),$$

где $T(s)$ – терм-множество $\{A_i\}, i = \overline{1, n}$;

M – отображение $M: T(s) \longrightarrow F(R)$;

$F(R)$ – множество нечетких чисел $\{U_i\}$, $i = \overline{1, n}$, $U_i = M(A)$.

Лингвистические переменные представляют в словесной форме экспертные знания для формализации неколичественной информации о состоянии Сло.,

В [97] показано, что в основу мировосприятия человека заложена оппозиционная шкала. Оппозиционные шкалы образуются с помощью пар слов антонимов. Для лингвистических переменных шкалы могут содержать понятия низкий – высокий, слабый – сильный, зима – лето и др.

Определение 3-17. Нечеткой оппозиционной шкалой назовем нечеткую лингвистическую шкалу, терм-множество которой включает термы, являющиеся антонимами.

Между концами оппозиционной шкалы интерполяцией можно определить любую величину в процессе решения задачи.

Определение 3-18. Пусть задана нечеткая оппозиционная шкала $(T(s), M)$. Пусть A_1 и A_n – термы антонимы. Нейтральной позицией нечеткой оппозиционной шкалы назовем терм A_p , $1 < p < n$, для которого выполняется условие:

$$\tilde{q}(U_1, U_p) \cong \tilde{q}(U_p, U_n) \cong 0.5 \tilde{q}(U_1, U_n), \quad (3.23)$$

где \tilde{q} – метрика на $F(R)$ в смысле определения 3-8.

В этом случае U_p называется нейтральной или центральной точкой оппозиционной шкалы. В связи с этим справедливо следующее утверждение.

Утверждение 3-3. Пусть задана нечеткая оппозиционная шкала $(T(s), M)$. Тогда нейтральная точка U_p определяется по следующей формуле:

$$U_p = \frac{(U_1 \oplus U_n)}{2}. \quad (3.24)$$

Доказательство. Докажем выполнение (3.24). Пусть заданы

$$U_1 = (u_1, u_1^\alpha, u_1^\beta), \quad U_n = (u_n, u_n^\alpha, u_n^\beta) \in R.$$

Тогда по (3.13а)

$$\tilde{q}(U_1, U_p) = \tilde{q}\left(U_1, \frac{(U_1 \oplus U_n)}{2}\right) = \left(\left|u_1 - \frac{(u_1 + u_n)}{2}\right|, \left|u_1^\alpha - \frac{(u_1^\alpha + u_n^\alpha)}{2}\right|, \left|u_1^\beta - \frac{(u_1^\beta + u_n^\beta)}{2}\right|\right)$$

$$= \left(\left| \frac{(u_1 - u_n)}{2} \right|, \left| \frac{(u_1^\alpha - u_n^\alpha)}{2} \right|, \left| \frac{(u_1^\beta - u_n^\beta)}{2} \right| \right) = 0.5\tilde{q}(U_1, U_n).$$

Что и требовалось доказать.

Нечеткие оппозиционные шкалы являются важными не только для лингвистических переменных, но и для соотнесения вербальных оценок эксперта соответствующим числовым значениям состояния Сло.

3.4.3 Описание состояния Сло нечеткими функциями в пространстве лингвистических переменных

Решение задачи описания состояния Сло нечеткими моделями состоит в построении продукционных правил на основе нечетких лингвистических переменных [3,76,201,218,224]. В [85,86,97,121-124,239,259] показано, что эксперту удобнее всего представлять свои знания в виде цепочки причинно-следственных связей типа "*если ... , то ...*". При этом причины считают входными параметрами, а следствия – выходными.

Определение 3-19. Описание состояния Сло вида:

Если $A_{11}, \dots, A_{1j}, \dots, A_{1n}$, то V_1 , иначе

.....

Если $A_{i1}, \dots, A_{ij}, \dots, A_{in}$, то V_i , иначе

.....

Если $A_{m1}, \dots, A_{mj}, \dots, A_{mn}$, то V_m , иначе, (3.25)

где $A_j \in T(X_j), B_i \in T(Y), \forall i = \overline{1, m}; \forall j = \overline{1, n}$; n – количество входных переменных; m – количество продукционных правил, будем называть схемой нечетких рассуждений первого рода, если выходная лингвистическая переменная Y одна.

Определение 3-20. Пусть задана схема нечетких рассуждений первого рода. Нечеткое отображение вида

$$\Phi: (U_{i1}, \dots, U_{ij}, \dots, U_{in}) \rightarrow V_i,$$

где $U_{ij} = M(A_{ij}), U_{ij} \in F(R); \forall i = \overline{1, m}; \forall j = \overline{1, n}; V_i = M(B), V_i \in F(R); \forall i = \overline{1, m};$

назовем нечетким отображением первого рода.

Схема нечетких рассуждений (3.25) позволяет каждому набору значений входных лингвистических переменных ставить в соответствие конкретное значение выходной лингвистической переменной. Однако на практике такое условие не всегда выполнимо. Так, в случае опроса нескольких экспертов может появиться неопределенность при задании соответствия между значениями входных и выходной лингвистической переменной. Таким образом, более общим случаем представления информации о состоянии СЛО является схема нечетких рассуждений, которая каждому набору значений входных лингвистических переменных ставит в соответствие не одно значение выходной лингвистической переменной, а все значения с некоторой степенью соответствия (весом) нечеткому терм-множеству $T(Y)$.

Определение 3-21. Пусть имеется n входных x_j , одна выходная лингвистическая переменная Y и степень соответствия r набору значений входных лингвистических переменных значениям выходной лингвистической переменной. Описание состояния СЛО вида:

Если $A_{11}, \dots, A_{1j}, \dots, A_{1n}$, то $r_{11}/B_1, \dots, r_{1s}/B_s$, иначе

.....
 Если $A_{i1}, \dots, A_{ij}, \dots, A_{in}$, то $r_{i1}/B_1, \dots, r_{is}/B_s$, иначе (3.26)

.....
 Если $A_{m1}, \dots, A_{mj}, \dots, A_{mn}$, то $r_{m1}/B_1, \dots, r_{ms}/B_s$,

где $A_{ij} \in T(X_j)$, $\forall i = \overline{1, m}; \forall j = \overline{1, n}$;

$B_s \in T(Y)$, $r_{is} \in [0, 1]$; $\forall i = \overline{1, m}; \forall j = \overline{1, m}; \forall s = \overline{1, p}$,

p – число делений шкалы выходной переменной,

будем называть схемой нечетких рассуждений второго рода.

Иными словами, каждому набору значений входных лингвистических переменных ставится в соответствие нечеткое терм-множество

$$T(Y) = (r_{i1}/B_1, \dots, r_{is}/B_s).$$

Определение 3-22. Пусть задана система нечетких рассуждений второго рода. Нечеткое отображение вида

$$\tilde{\Phi}: (U_{i1}, \dots, U_{ij}, \dots, U_{in}) \rightarrow (r_{i1}/V_1, \dots, r_{is}/V_s),$$

$$\text{где } U_{ij} = M(A_{ij}), U_{ij} \in F(R), \quad \forall i = \overline{1, m}; \forall j = \overline{1, n}$$

$$V_s = M(B_s), \quad V_s \in F(R); \quad r_{is} \in \{0, 1\}; \quad \forall i = \overline{1, m}; \forall j = \overline{1, m}, \quad \forall s = \overline{1, p}$$

назовем нечетким отображением второго рода.

Заметим, что нечеткое отображение второго рода превращается в нечеткое отображение первого рода если $\forall i = \overline{1, m} \quad r_{is} \in \{0, 1\}$; тогда существует такое единственное $V_d \in F(R)$, что $r_{id} = 1$.

Определение 3-23. Нечеткое терм-множество $\tilde{T}(Y) = (r_{i1}/B_1, \dots, r_{ik}/B_k)$ называется согласованным, если

$$\forall V_s = M(B_s), \quad V_s \in F(R), \quad r_{is} \in [0, 1]; \quad \forall i = \overline{1, m}, \quad s = \overline{1, p};$$

$$Pos(V_{s-1} \geq V_s) = Pos(V_s \geq V_{s+1}) = 1 \Rightarrow r_s \geq \min\{r_{s-1}, r_{s+1}\}. \quad (3.27)$$

Определение 3-24. Пусть задано нечеткое отображение второго рода вида

$$\tilde{\Phi}: (U_{i1}, \dots, U_{ij}, \dots, U_{in}) \xrightarrow{1} (r_{i1}/V_1, \dots, r_{is}/V_s).$$

Назовем его согласованным нечетким отображением второго рода, если все его $\tilde{T}(Y)$, $i = \overline{1, m}$ являются согласованными.

Рассмотрим возможность аппроксимации нечеткого отображения второго рода нечетким отображением первого рода.

Теорема 3-8. Пусть задано согласованное нечеткое терм-множество

$$\tilde{T}(Y) \cong (r_1/B_1, \dots, r_{is}/B_s). \quad \text{Тогда } \exists G \in F(R), \text{ что}$$

$$\tilde{T}(Y) \cong (r_{i1}/V_1, \dots, r_{is}/V_s) = (Pos(G=V_1)/V_1, \dots, Pos(G=V_s)/V_s),$$

$$\text{где } V_s = M(B_s) \in F(R), \quad r_s \in [0, 1]; \quad s = \overline{1, p}.$$

Доказательство. По условию $\tilde{T}(Y)$, как и все нечеткие числа (LR)-типа, выпукло. Тогда по утверждению 3-2

$$r_{is} = Pos(V_s = G).$$

Таким образом, доказательство сведено к решению задачи математического программирования вида:

$$G = \text{Argmin} \left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [\mu_{s_i}(V_s) - \text{Pos}(V_s = G_i)]^r \right)^{1/r},$$

откуда $\tilde{T}(Y) = (r_1/V_1, \dots, r_s/V_s) = (\text{Pos}(G_i=V_1)/V_1, \dots, \text{Pos}(G_i=V_s)/V_s)$.

Что и требовалось доказать.

Определение 3-25. Пусть задано согласованное нечеткое отображение второго рода

$$\tilde{\Phi}: (U_{i1}, \dots, U_{ij}, \dots, U_{in}) \xrightarrow{i} (r_{i1}/V_1, \dots, r_{is}/V_s) \text{ и } \exists G_i \in F(R), i = \overline{1, m} \text{ такое, что}$$

$$\tilde{T}(Y) = (r_1/V_1, \dots, r_s/V_s) = (\text{Pos}(G_i=V_1)/V_1, \dots, \text{Pos}(G_i=V_s)/V_s),$$

где $V_s = M(B_s)$, $V_s \in F(R)$, $r_s \in [0, 1]$; $i = \overline{1, m}$, $s = \overline{1, p}$;

Тогда, если $\Phi: (U_{i1}, \dots, U_{ij}, \dots, U_{in}) \Rightarrow G_i$ – нечеткое отображение первого рода, то будем говорить, что Φ аппроксимирует $\tilde{\Phi}$.

Следствие 3-4. Для любого согласованного отображения второго рода Φ существует нечеткое отображение первого рода $\tilde{\Phi}$, которое его аппроксимирует.

Доказательство следует из теоремы 3-8 и определения 3-25.

Сформулируем теорему возможности аппроксимации схемы нечетких рассуждений второго рода нечеткой непрерывной функцией.

Теорема 3-9. Пусть задано согласованное нечеткое отображение второго рода $\tilde{\Phi}$. Тогда существует такая нечеткая функция

$$f(U_1, \dots, U_j, \dots, U_n), \text{ что}$$

$$\tilde{\Phi}(U_{i1}, \dots, U_{ij}, \dots, U_{in}) = f(U_1, \dots, U_j, \dots, U_n)$$

$$\text{при } (U_{i1}, \dots, U_{ij}, \dots, U_{in}) = (U_1, \dots, U_j, \dots, U_n),$$

где f аппроксимирует $\tilde{\Phi}$ и

$$U_j \in [\inf(U_{ij}), \sup(U_{ij})], U_{ij} = M(A_{ij}), U_{ij} \in F(R), \forall i = \overline{1, m}, \forall j = \overline{1, n}.$$

Доказательство. По условию

$$\tilde{\Phi}: (U_{i1}, \dots, U_{ij}, \dots, U_{in}) \xrightarrow{i} (r_{i1}/V_1, \dots, r_{is}/V_s),$$

где $U_{ij} = M(A_{ij}) \in F(R)$, $\forall i = \overline{1, m}, \forall j = \overline{1, n}$, $V_s = M(B_s) \in F(R)$,

$$r_s \in [0, 1]; \quad i = \overline{1, m}, \quad s = \overline{1, p}.$$

На основании следствия 3-4 $\tilde{\Phi}(U_{i1}, \dots, U_{ij}, \dots, U_{in})$ аппроксимируется $\Phi(U_{i1}, \dots, U_{ij}, \dots, U_{in})$.

По теореме 3-6 $(U_{i1}, \dots, U_{ij}, \dots, U_{in}) \in (F(R)^n, q)$.

Таким образом, задача сводится к следующему:

по множеству упорядоченных наборов нечетких чисел вида

$$(V_1, U_{11}, \dots, U_{1n}), (V_2, U_{21}, \dots, U_{2n}), \dots, (V_m, U_{m1}, \dots, U_{mn})$$

требуется построить аппроксимирующую нечеткую функцию

$$V_i = f(\tilde{U}_1, \dots, \tilde{U}_j, \dots, \tilde{U}_n, B_1, \dots, B_j, \dots, B_n), \quad (3.28)$$

где $\tilde{U}_j = \{U_{1j}, \dots, U_{ij}, \dots, U_{mj}\}$, $B_j \in F(R)$, $\forall i = 1, \dots, m$, $\forall j = 1, \dots, n$

при

$$Q = \sum_{i=1}^m \tilde{q}(V_i, \sum_{j=1}^n (U_{ij} \otimes B_j))^2 \Rightarrow \min. \quad (3.29)$$

Используя определение 3-14, нечеткое расстояние в нечетком пространстве (3.29) можно представить в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} q = \sum_{i=1}^m (v_i - \sum_{j=1}^n (u_{ij} b_j))^2 \Rightarrow \min \\ q^\alpha = \sum_{i=1}^m (v_i^\alpha - \sum_{j=1}^n (u_{ij} b_j^\alpha + u_{ij}^\alpha b_j))^2 \Rightarrow \min \\ q^\beta = \sum_{i=1}^m (v_i^\beta - \sum_{j=1}^n (u_{ij} b_j^\beta + u_{ij}^\beta b_j))^2 \Rightarrow \min \end{array} \right., \quad (3.30)$$

где q , v_i , u_{ij} , b_j – представительное значение или моды нечетких чисел Q, V_i, U_{ij}, B_j ;

q^α , v_i^α , u_{ij}^α , b_j^α – левые коэффициенты нечеткости;

q^β , v_i^β , u_{ij}^β , b_j^β – правые коэффициенты нечеткости.

В (3.30) входят только функции действительного переменного, дифференцируемого по всем аргументам. Тогда

$$\left\{ \begin{array}{l} \partial q / \partial b_\nu = -2 * \sum_{i=1}^m (v_i - \sum_{j=1}^n (u_{ij} b_j)) * u_{i\nu} = 0, \\ \partial q^\alpha / \partial b_\nu^\alpha = -2 * \sum_{i=1}^m (v_i^\alpha - \sum_{j=1}^n (u_{ij} b_j^\alpha + u_{ij}^\alpha b_j)) * u_{i\nu} = 0, \quad \nu = 1, 2, \dots, p, \\ \partial q^\beta / \partial b_\nu^\beta = -2 * \sum_{i=1}^m (v_i^\beta - \sum_{j=1}^n (u_{ij} b_j^\beta + u_{ij}^\beta b_j)) * u_{i\nu} = 0. \end{array} \right. \quad (3.31)$$

Отсюда

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^m u_{i\nu} \sum_{j=1}^n (u_{ij} b_j) = \sum_{i=1}^m u_{i\nu} v_i, \\ \sum_{i=1}^m u_{i\nu} \sum_{j=1}^n (u_{ij} b_j^\alpha + u_{ij}^\alpha b_j) = \sum_{i=1}^m u_{i\nu} v_i^\alpha, \\ \sum_{i=1}^m u_{i\nu} \sum_{j=1}^n (u_{ij} b_j^\beta + u_{ij}^\beta b_j) = \sum_{i=1}^m u_{i\nu} v_i^\beta. \end{array} \right. \quad (3.32)$$

Переходя к введенному в главе 2 симметризованному представлению параметров нечеткого числа с учетом $d(b_j) \geq |\Delta(b_j)|$, получаем:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^m u_{i\nu} \sum_{j=1}^n (u_{ij} b_j) = \sum_{i=1}^m u_{i\nu} v_i, \\ \sum_{i=1}^m u_{i\nu} \sum_{j=1}^n (u_{ij} d(b_j) + d(u_{ij}) b_j) = \sum_{i=1}^m u_{i\nu} d(v_i), \\ \sum_{i=1}^m u_{i\nu} \sum_{j=1}^n (u_{ij} \Delta(b_j) + \Delta(u_{ij}) b_j) = \sum_{i=1}^m u_{i\nu} \Delta(v_i). \end{array} \right. \quad (3.33)$$

Найдя из уравнения (3.33) параметры нечетких коэффициентов B_j , получим искомую функцию (3.28).

Что и требовалось доказать.

Таким образом, построение искомой функции (3.28) теоретически доказано, однако необходимо учитывать ограничения, налагаемые на представление нечеткого числа в симметризованном виде по определению 2-3, а также необходимость применения методов теории планирования экспериментов, для чего осуществим представление плана опроса эксперта в пространстве лингвистических переменных.

3.5 МЕТОД ИЗВЛЕЧЕНИЯ И СТРУКТУРИЗАЦИИ ЭКСПЕРТНОЙ ИНФОРМАЦИИ В ВИДЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Предлагаемое представление схемы нечетких рассуждений аналитическими функциями предполагает, что входные лингвистические переменные являются невзаимодействующими. Это понятие аналогично понятию независимых величин в теории вероятности. Однако в реальных условиях входные переменные часто являются зависимыми [79,80,99-102,191,192,200,211,229], что существенно сужает область применимости процедур аппроксимации исходных знаний эксперта о заданной предметной области аналитической функцией и ведет к увеличению ошибки самой аппроксимации «пассивного эксперимента» при обработке данных [17,18,44-47,141,142,212,213,225,271].

Сложившаяся практика опроса экспертов предусматривает, как правило, варьирование только одной из входных переменных. Такой подход, кроме резкого возрастания объема экспертируемой информации, вызывает физическую и психологическую усталость эксперта и, как следствие, возрастание числа ошибочных оценок, а также увеличение времени создания модели [27,181-186, 223].

Следовательно, возникает необходимость разработки такой технологии опроса эксперта, которая должна, с одной стороны, устранить влияние взаимозависимости входных переменных, использовать естественный язык в данной области знаний и минимизировать работу эксперта, а с другой – позволять формализацию полученной от него информации представить в виде аналитического выражения (в общем случае аналитических выражений).

Для выполнения всех этих требований ниже предложено оригинальное представление плана опроса эксперта в пространстве лингвистических переменных.

3.5.1 Модифицированное представление оптимальных планов опроса в пространстве лингвистических переменных

Математической основой такого подхода выступает теория планирования экспериментов в пространстве нечетких переменных. Согласно теории

планирования экспериментов, матрица опроса обладает ценными для эксперта свойствами ортогональности и ротатабельности [7, 32,47,150,259]. Первое из этих свойств решает задачу независимости переменных, а второе – позволяет полагать, что ошибки определений по всем лингвистическим переменным одинаково возрастающими при удалении от центра планирования, что хорошо укладывается в сознании эксперта.

Определение 3-26. Набор значений $A_{ij} \in T(X_j), \forall i = \overline{1, m}; \forall j = \overline{1, n}$ назовем планом опроса, а матрицу

$$A = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{m1} & A_{m2} & \dots & A_{mn} \end{pmatrix} \quad (3.34)$$

опросной матрицей.

Опрос эксперта проводится на свойственном ему профессиональном языке, то есть в лингвистическом виде, а представление результатов опроса – с помощью процедуры «арифметизации» [152,153,162,268,269].

3.5.2 Кодирование значений входных лингвистических переменных

Согласно теории планирования экспериментов для дальнейшей обработки высказываний эксперта используется информация, формируемая в вершинах гиперкуба [7,150], и для получения сравнимых коэффициентов модели оценивания состояния СЛО осуществляется процедура кодирования переменных в единый стандартизованный масштаб $[-1,+1]$ по каждой переменной. Тогда матрицу (3.34) можно рассматривать как набор экспертных оценок в пространстве m продукционных правил (строк), содержащих n лингвистических переменных (столбцов), значения которых варьируются на двух уровнях.

Для представления лингвистической переменной \tilde{U}_j в кодированом виде необходимы две величины: интервал варьирования и основной уровень, относительно которого варьируется значения соответствующей лингвистической

переменной. Наибольшее и наименьшее значения переменной будут принимать следующие значения

$$U_{lj} = \inf(U_{ij}), \quad U_{mj} = \sup(U_{ij}), \quad \forall i = \overline{1, m}, \forall j = \overline{1, n}.$$

Определение 3-27. Пусть имеется множество значений $A_{ij} \in T(X_j)$ переменных X_j , задаваемых в лингвистическом виде \tilde{U}_j . Интервалом варьирования лингвистической переменной называется нечеткое число H_j , определяемое с учетом дополнительной операции как

$$H_j = (H_{mj} \Theta_{\text{доп}} H_{lj})/2 \quad (3.35)$$

Определение 3-28. Пусть имеется множество значений $A_{ij} \in T(X_j)$ переменных X_j в лингвистическом виде \tilde{U}_j . Основным уровнем, относительно которого варьируется X_j , называется такое нечеткое число U_j^o , что

$$U_j^o = \frac{(U_{lj} \oplus_{\text{âîî}} U_{mj})}{2}. \quad (3.36)$$

Рассмотрим переход от значений $M(A_{ij})$ некоторой лингвистической переменной к ее изображению в относительных безразмерных величинах. Для этого введем понятие псевдометрического нечеткого числа, расширив область определения арифметической операции «дополнительное вычитание» (глава 2).

Определение 3-29. Пусть $A \Theta_{\text{доп}} B$ определено и существует $\forall A, B: \mu_A, \mu_B \in F(R)$. Тогда виртуальным нечетким числом $A_{\text{пс}}$, противоположным нечеткому числу $A = (a, d(A), \Delta(A))$, будем называть кортеж

$$A_{\text{пс}} = 0 \Theta_{\text{доп}} A = (0 - a, 0 - d(A), 0 - \Delta(A)). \quad (3.37)$$

Определение 3-30. Пусть $\forall A, B: \mu_A, \mu_B \in F(R)$ определены и существуют $A \Theta_{\text{доп}} B$ и $A \otimes_{\text{доп}} B$. Тогда кодированные значения $\forall A_{ij} \in T(x_j)$ лингвистических переменных X_j , таких что $U_{ij} = M(A_{ij}), U_{ij} \in F(R), \forall i = \overline{1, m}$; с учетом (3.35) и (3.36) будут определяться как:

$$U_{ij}^k = (U_{lj} \Theta_{\text{доп}} U_{mj}^o) \otimes_{\text{доп}} H_j. \quad (3.38)$$

Обратное преобразование кодированных переменных будет иметь вид:

$$U_{ij} = (H_j \otimes U_{ij}^k) \oplus U_{ij}^o \quad (3.39)$$

Согласно методам решения нечетких уравнений (утверждения 2-3 – 2-8 о равносильных переходах) очевидно, что (3.38) является решением уравнения (3.39), где $U_{ij}^k \in F(\mathbb{R})$ – значение переменной .

Определение 3-31. Если элементы U_{ij}^k опросной матрицы являются кодированными значениями, то матрицу плана опроса будем использовать в расчетной матрице U .

В теории планирования экспериментов для получения аналитических моделей, учитывающих взаимодействия входных переменных, используются двухуровневые планы, строки и столбцы которых в кодированном виде содержат концы оппозиционных шкал «+1» и «-1». Иными словами, матрица становится *двухуровневой*. Поскольку столбцы опросной матрицы составляют переменные факторного пространства, то каждая строка соответствует определенной ситуации, описываемой в виде продукционного правила.

Определение 3-32. Двухуровневой матрицей плана опроса будем называть такую матрицу $A = \|A_{ij}\|_{m \times n}$, что $\forall i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}, A_{ij} \in \{A_{1j}, A_{mj}\}$.

Тогда будет справедлива следующая лемма.

Лемма 3-1. Для любой двухуровневой матрицы $A = \|A_{ij}\|_{m \times n}$ элементы опросной матриц примут значения $U_{ij}^k \in \{-1, +1\}$.

Доказательство. Применяя *стандартизованную форму* представления нечетких чисел (2.35) к (3.38), при условии $U_{1j} = M(A_{1j}), U_{mj} = M(A_{mj})$ получаем для нижнего уровня:

$$U_{ij}^k = \left(U_{1j} - \frac{(U_{1j} + U_{mj})}{2}, d(U_{1j}) - \frac{(d(U_{1j}) + d(U_{mj}))}{2}, \Delta U_{1j} - \frac{(\Delta(U_{1j}) + \Delta(U_{mj}))}{2} \right) \ominus_{\text{доп}} H_j =$$

$$= \left(\frac{(U_{1j} - U_{mj})}{2}, -\frac{(d(U_{1j}) - d(U_{mj}))}{2}, \frac{(\Delta(U_{1j}) - \Delta(U_{mj}))}{2} \right) \ominus_{\text{доп}}$$

$$\frac{|U_{mj} - U_{lj}|[d(U_{lj}) - d(U_{mj})] - |U_{lj} - U_{mj}|[d(U_{mj}) - d(U_{lj})]}{(U_{mj} - U_{lj})^2} =$$

$$= \frac{(U_{lj} - U_{mj})(\Delta U_{mj} - \Delta U_{lj}) + (U_{mj} - U_{lj})(\Delta U_{mj} - \Delta U_{lj})}{(U_{mj} - U_{lj})^2} = (-1, 0, 0) = -1.$$

Аналогичным образом для верхнего уровня $U_{ij}^k = +1$.

Что и требовалось доказать.

При построении двухуровневых планов опроса возникает задача определения уровней варьирования входных лингвистических переменных для поиска наиболее информативных их сочетаний. Дело в том, что получаемая информация зависит не только от предъявляемых значений входных лингвистических переменных, но и от того, каков будет ответ эксперта.

Другими словами, применение в качестве уровней варьирования концов нечеткой оппозиционной шкалы входных лингвистических переменных может привести к сочетаниям, являющимся невозможными в понимании эксперта. Таковыми могут быть сочетания, куда одним из его составляющих будет входить значение *предельного* [140-144] состояния Сло. Одним из методов преодоления указанного недостатка является выявление порогов чувствительности на нечеткой оппозиционной шкале входных лингвистических переменных и их использование при определении уровней варьирования.

Определение 3-33. Пусть задано нечеткое отображение первого рода. Тогда правым порогом чувствительности экспертной оценки A_{rj} переменной X_j назовем значение U_r , после которого $\forall A_{ij} \in T(X_j)$ выполняется условие

$$V_r = \Phi(U_{i1}, \dots, U_{in}), \quad r < i \leq m, \quad (3.40)$$

где $U_{ij} = M(A_{ij})$, $V_r = M(B_r)$, $V_r, U_{ij} \in F(R)$, $\forall j = \overline{1, n}$.

Левым порогом чувствительности U_l экспертной оценки назовем значение A_{lj} переменной X_j , после которого $\forall A_{ij} \in T(X_j)$ выполняется условие

$$V_l = \Phi(U_{i1}, \dots, U_{in}), \quad l < i \leq m, \quad (3.41)$$

где $U_{ij} = M(A_{ij})$, $V_l = M(B_l)$, $V_l, U_{ij} \in F(R)$, $\forall j = \overline{1, n}$.

Лемма 3-2. Пусть задано нечеткое отображение первого рода $V = \Phi(\tilde{U}_{ij}^k)$ и для входной лингвистической переменной X_j существуют такие значения A_k , что

$V_r = \Phi(\tilde{U}_i)$, $r < i \leq m$, и такие значения A_l , что $V_l = \Phi(\tilde{U}_i)$, $l < i \leq l$. Тогда основной уровень U_j^o и интервал варьирования H_j будут определяться на укороченном интервале как

$$H_j = (U_r \Theta_{\text{доп}} U_l) / 2, \quad (3.42)$$

$$U^o = \frac{(U_l \oplus_{\text{доп}} U_r)}{2}, \quad (3.43)$$

где $U_i = M(A_i) \in F(R)$, $\forall i = \overline{1, m}$.

Доказательство. Из условия

$$U_r = \min_{\hat{O}(U_i)} \{U_r, U_{r+1}, \dots, U_n\} \quad (3.44a)$$

$$U_l = \max_{\hat{O}(U_i)} \{U_r, U_{l-1}, \dots, U_l\}. \quad (3.44b)$$

Тогда (3.42), (3.43) с учетом (3.44) примут вид:

$$H = (\{U_r, U_{r+1}, \dots, U_n\} \Theta_{\text{доп}} \{U_r, U_{l-1}, \dots, U_l\}) / 2 = (U_r \Theta_{\text{доп}} U_l) / 2, \quad (3.45)$$

$$U^o = \frac{\{U_r, U_{r+1}, \dots, U_n\} \oplus_{\text{доп}} \{U_r, U_{l-1}, \dots, U_l\}}{2} = \frac{(U_l \oplus_{\text{доп}} U_r)}{2}. \quad (3.46)$$

Что и требовалось доказать.

Таким образом, применение в качестве уровней варьирования левого и правого порогов чувствительности позволяет исключить невозможные сочетания значений входных лингвистических переменных и построить двухуровневый план опроса. Иными словами, рассматривается только такой измеряемый диапазон варьирования переменной, который обуславливает возможные значения сочетаний входных переменных.

Исходя из основных положений теории планирования экспериментов число вопросов, задаваемых эксперту, должно быть равно числу возможных сочетаний уровней входных лингвистических переменных, т. е.

$$N = 2^n, \quad (3.47)$$

где n – число входных лингвистических переменных.

Если учесть, что полученные сочетания значений входных лингвистических переменных обуславливают количество строк опросной матрицы – нечетких продукционных правил, то они являются информативными, а их количество ограничено и минимально для решения конкретной задачи.

3.5.3 Исследование свойств опросных и расчетных матриц

Определение 3-34. Двухуровневая матрица U^k называется ортогональной, если выполняются условия:

$$\sum_{i=1}^m U_{ij}^k = 0; \quad \sum_{i=1}^m (U_{ij}^k)^2 = m; \quad \sum_{i=1}^n U_{il}^k U_{is}^k = 0, \forall l \neq s. \quad (3.48)$$

Лемма 3-3. Пусть ранг опросной матрицы равен n – количеству переменных $rank U = n$. Тогда решение (3.33) единственно, то есть существует единственная нечеткая аппроксимирующая функция.

Доказательство. Из условия $rank U = n \Rightarrow rank U^T U = n$ следует, что матрица $C = U^T U$ – невырождена. Тогда обратная матрица C^{-1} существует и единственна. Отсюда решение (3.33) единственно.

Что и требовалось доказать.

Ортогональность и кодированность опросной матрицы выступают важнейшими условиями построения моделей, поскольку расположение точек опроса в вершинах гиперкуба обуславливает независимость и сравнимость коэффициентов при переменных аппроксимирующей модели.

3.5.4 Нахождение параметров нечетких коэффициентов полиномиальной модели

Для нахождения параметров нечетких коэффициентов аппроксимирующей функции воспользуемся следующей леммой.

Лемма 3-4. Пусть матрица U^k ортогональная, тогда коэффициенты полиномиального разложения в симметризованном виде (2.35) $V_j = (b_j, \Delta b_j, d(b_j))$ вычисляются по следующим формулам

$$\begin{aligned}
b_j &= \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m V_i U_{ij}^k \\
\Delta b_j &= \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \Delta V_i U_{ij}^k \\
d(b_j) &= \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m d(V_i) U_{ij}^k
\end{aligned} \tag{3.49}$$

Доказательство. Пусть $C = U^T U$ и $D = C^{-1}$ – обратная матрица. Из условия $\forall i, j = \overline{1, n}, C_{ij} = 0, D_{ij} = 0$ при $i \neq j$, применяя этот результат к теореме 4-3, получаем:

$$\begin{aligned}
b_j &= \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m V_i U_{ij}^k \\
\Delta b_j &= \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\Delta V_i U_{ij}^k - \Delta U_{ij}^k b_j) \\
d(b_j) &= \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (d(V_i) U_{ij}^k - d(U_{ij}^k) b_j)
\end{aligned} \tag{3.50}$$

По лемме 3-1 $U: U_{ij}^k \in \{-1, 1\} \Rightarrow \Delta U_{ij}^k = d(U_{ij}^k) = 0$.

Отсюда

$$\begin{aligned}
b_j &= \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m V_i U_{ij}^k \\
\Delta b_j &= \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \Delta V_i U_{ij}^k \\
d(b_j) &= \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m d(V_i) U_{ij}^k
\end{aligned} \tag{3.51}$$

Что и требовалось доказать.

Ортогональные матрицы обладают свойством, при котором умножение двух или нескольких столбцов дает также ортогональный столбец. Полученные таким образом столбцы дают возможность определять коэффициенты при «эффектах взаимодействия» входных переменных, иными словами, строить нелинейные полиномиальные модели [8,32,140].

Определение 3-35. Эффектом взаимодействия входных лингвистических переменных называется столбец в кодированном виде расчетной матрицы плана опроса эксперта U^k , построенный умножением типа

$$(U_{1j}^k, U_{2j}^k, \dots, U_{nj}^k) \bullet (U_{1j+1}^k, U_{2j+1}^k, \dots, U_{nj+1}^k) = (U_{1j}^k \bullet U_{1j+1}^k, U_{2j}^k \bullet U_{2j+1}^k, \dots, U_{nj}^k \bullet U_{nj+1}^k)$$

некоторого количества входных лингвистических переменных, ортогональный к ним.

Из приведенного определения следует, что при построении нелинейной модели на основании ортогональной матрицы появляется возможность оценить парные и более высокой степени взаимовлияния входных лингвистических переменных друг на друга и учесть их в модели [7,150,224,259].

Утверждение 3-4. К знаниям эксперта, представленным в виде опросной матрицы с элементами в кодированном виде, применимы методы классической теории планирования эксперимента с получением аналитической функции следующего вида:

$$V = B_0 \oplus \sum_{j=1}^n B_j \otimes \tilde{U}_j^k \oplus \sum_{u,j=1}^n B_{ju} \otimes \tilde{U}_j^k \otimes \tilde{U}_u^k \oplus \dots, \quad (3.52)$$

где $\tilde{U}_j^k, \tilde{U}_u^k, j, u = \overline{1, n}, j \neq u$, – входные нечеткие лингвистические переменные в кодированном виде;

$\tilde{U}_j^k \otimes \tilde{U}_u^k$ – парное взаимодействие входных переменных.

Доказательство вытекает из теорем 3-8 и 3-9.

Возможность представления экспертных знаний полиномиальным разложением естественным образом отвечает существующей в его сознании понятийной модели исследуемого явления или управления технологическим процессом.

Определение 3-36. Пусть

$$\varepsilon = \tilde{q}(V, f(\tilde{U}_1^k, \tilde{U}_2^k, \dots, \tilde{U}_n^k)) \Rightarrow V = f(\tilde{U}_1^k, \tilde{U}_2^k, \dots, \tilde{U}_n^k) \oplus \varepsilon,$$

где $\tilde{U}_j^k = \{U_{1j}^k, U_{2j}^k, \dots, U_{mj}^k\}, j = \overline{1, n}$.

Тогда расчетную матрицу плана опроса U^k называют ротатабельной, если ошибка $\varepsilon_{B_j} = R \otimes \varepsilon / \sqrt{n}$, где $R = \tilde{q}((U_{1j}^k, U_{2j}^k, \dots, U_{mj}^k), 0)$, R – радиус сферы с центром в $U_j^k = 0$.

Лемма 3-5. Если расчетная матрица плана опроса эксперта ортогональна, то она и ротатабельна.

Доказательство. Пусть $\forall U_{ij}^k \in \sum_{i=1}^n U_{il}^k U_{is}^k = 0, \quad l \neq s$ и

$$\varepsilon = \tilde{q}\left(V, f(\tilde{U}_{1j}^k, \tilde{U}_{2j}^k, \dots, \tilde{U}_{mj}^k)\right) \Rightarrow V = f(\tilde{U}_{1j}^k, \tilde{U}_{2j}^k, \dots, \tilde{U}_{mj}^k) \oplus \varepsilon.$$

Тогда по результатам теоремы 3-6 и лемм 3-1, 3-4, ошибка определения $\varepsilon_{B_j} = \varepsilon / \sqrt{n}$.

Применяя закон накопления ошибок к (3.28), получаем

$$\varepsilon_{B_j} = \tilde{q}\left((U_1^k, U_2^k, \dots, U_n^k), 0\right) \otimes \varepsilon / \sqrt{n} = R \otimes \varepsilon / \sqrt{n}. \quad (3.53)$$

Утверждение 3-5. Значения $U_{ij}^k \in \{-1, 1\}$. Пусть

$$\forall L_{ij}^k, \quad -1 < L_{ij}^k < 1.$$

Тогда возможность того, что ошибка при значениях переменных на концах оппозиционной шкалы максимальна, будет определяться следующим условием:

$$\text{Pos}\left(\tilde{q}\left(V, f(U_1^k, U_2^k, \dots, U_n^k)\right) \geq \tilde{q}\left(V, f(L_1^k, L_2^k, \dots, L_n^k)\right)\right) = 1.$$

Доказательство. Пусть $U : U_{ij}^k \in \{-1, 1\}$ и $\forall L_{ij}^k, \quad -1 < L_{ij}^k < 1,$

$$\varepsilon_U = \tilde{q}\left(V, f(U_1^k, U_2^k, \dots, U_n^k)\right), \quad \tilde{\varepsilon}_L = q\left(V, f(L_1^k, L_2^k, \dots, L_n^k)\right).$$

Из условия $R_U > R_L$, (все значения L_{ij}^k лежат внутри интервала $(-1, +1)$), то

(2.27)

$$\text{Pos}(\varepsilon_U \geq \varepsilon_L) = \max(0, \min(1, 1 + (\varepsilon_U - \varepsilon_L) / (\varepsilon_U^\beta - \varepsilon_L^\alpha))).$$

По лемме 3-5

$$R_U > R_L \Rightarrow \varepsilon_U > \varepsilon_L \Rightarrow (\varepsilon_U - \varepsilon_L) / (\varepsilon_U^\beta - \varepsilon_L^\alpha) \geq 0 \Rightarrow \text{Pos}(\varepsilon_U \geq \varepsilon_L) = 1.$$

Утверждение доказано.

Проведенное исследование показало принципиальную возможность формализации экспертных знаний аналитическим выражением, если эти знания извлечены и представлены на основе решения задач классов А и Б (глава 1).

3.5.5 Оценивание степени адекватности расчетов с использованием нечетких мер возможности и необходимости

Нечеткая модель (3.52), построенная по результатам опроса, позволяет провести оценивание агрегированного состояния СЛО с использованием соответствующих лингвистических переменных. При этом проверка меры адекватности модели мнению эксперта позволит получить ответ на вопрос, будет ли построенная модель определять значения выходной величины с той же точностью, что и эксперт?

Об адекватности нечеткой модели можно судить по отклонениям рассчитанных значений от экспертных оценок в каждой строке матрицы опроса как меры «возможности» такого исхода [81].

Определение 3-37. Пусть $\exists V_1$, что $V_1 = f(\tilde{U}_1^k, \tilde{U}_2^k, \dots, \tilde{U}_n^k)$, и невходящие в исходную выборку U_{vj}^k , где $\forall j = \overline{1, n}$, $U_{vj}^k \notin U$.

Тогда оценкой адекватности нечеткой модели будем считать величину «возможности» равного исхода по значениям переменных, не вошедших в первоначальную опросную матрицу

$$\text{Pos}(V_1 = V_v), \text{ где } V_v = M(B_v), V_v \in F(R). \quad (3.54)$$

Следующее утверждение описывает формулу оценивания несмещенности центра планирования опросной матрицы для построения нечеткой модели.

Утверждение 3-6. Пусть $\exists V_1$, что

$$V_1 = B_0 \oplus \sum_{j=1}^n B_j \otimes \tilde{U}_j^k \oplus \sum_{u,j=1}^n B_{ju} \otimes \tilde{U}_j^k \otimes \tilde{U}_u^k \oplus \dots,$$

где $j \neq u$, $U_j^k = 0$, $j, u = \overline{1, n}$.

Тогда $\text{Pos}(V_1 = V_v) = \text{Pos}(B_0 = V_v)$, где $V_v = M(B_v), V_v \in F(R)$.

Доказательство.

По условию

$$V_1 = B_0 \Rightarrow \text{Pos}(V_1 = V_v) = \text{Pos}(B_0 = V_v),$$

где $V_v = M(B_v), V_v \in F(R)$.

Учитывая свойства возможности [81,282-284], сформулируем условия, при которых нечеткую модель следует считать адекватной.

Определение 3-38. Пусть $\exists V_1$, что $V_1 = f(\tilde{U}_1^k, \tilde{U}_2^k, \dots, \tilde{U}_n^k)$, и не входящие в исходную выборку U_{vj}^k , где $\forall j = \overline{1, n}$, $U_{vj}^k \notin U$.

Будем считать нечеткую модель адекватной, если выполняется условие, состоящее в том, что возможность равенства полученных результатов будет выше, чем возможность большего или меньшего результата:

$$\text{Pos}(V_1 = V_v) > \text{Pos}(V_1 \triangleleft V_v),$$

$$\text{где } V_v = M(B_v), V_v \in F(R), \quad (3.55)$$

и согласно [81]

$$\text{Pos}(V_1 \triangleleft V_v) = 1 - \text{Nec}(V_1 = V_v). \quad (3.56)$$

Утверждение 3-7. Пусть $\exists V_1$, что

$$V_1 = B_0 \oplus \sum_{j=1}^n B_j \otimes \tilde{U}_j^k \oplus \sum_{u,j=1}^n B_{ju} \otimes \tilde{U}_j^k \otimes \tilde{U}_u^k \oplus \dots$$

Тогда нечеткая модель адекватна, если

$$\text{Pos}(V_1 = V_v) > \text{Pos}(V_1 \triangleleft V_v).$$

где $V_v = M(B_v), V_v \in F(R)$.

Доказательство. По условию

$$V_1 = B_0 \Rightarrow \text{Pos}(V_1 = V_v) = \text{Pos}(B_0 = V_v) \text{ и } \text{Nec}(V_1 = V_v) = \text{Nec}(B_0 = V_v),$$

где $V_v = M(B_v), V_v \in F(R)$.

По определению 3-38

$$\text{Pos}(V_1 \triangleleft V_v) = 1 - \text{Nec}(V_1 = V_v).$$

Отсюда критерий несмещенности примет вид:

$$\text{Pos}(B_0 = V_v) > \text{Pos}(B_0 \triangleleft V_v) > \text{Pos}(B_0 \triangleleft V_k). \quad (3.57)$$

В теории планирования экспериментов значимость коэффициентов разложения полинома определяют статистическими критериями, то есть пороговыми значениями, например, по критерию Стьюдента [17,18,104,139].

Следующее два утверждения позволят исключить из полиномиального разложения незначимые коэффициенты, не вносящие существенного вклада в изменение значения состояния СЛО.

Утверждение 3-8. Пусть $\exists V_1$, что

$$V_1 = B_0 \oplus \sum_{j=1}^n B_j \otimes \tilde{U}_j^k \oplus \sum_{u,j=1}^n B_{ju} \otimes \tilde{U}_j^k \otimes \tilde{U}_u^k \oplus \dots,$$

где $j \neq u$, $U_j^k = 0, j = \overline{1, n}$, и $\exists \varepsilon \in F(R)$,

$$\varepsilon_1 = \tilde{q}(V_1, f(\tilde{U}_1^k, \tilde{U}_2^k, \dots, \tilde{U}_n^k)) \Rightarrow V_1 = f(\tilde{U}_1^k, \tilde{U}_2^k, \dots, \tilde{U}_n^k) \oplus \varepsilon_1.$$

Тогда

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{B_j} = \tilde{q}(B_0, V_v).$$

Доказательство. Из леммы 3-5 $\varepsilon = R \otimes \varepsilon_{B_j}$.

По условию

$$\varepsilon_1 = \tilde{q}(B_0, V_v) \Rightarrow R = 1 \Rightarrow 1 \otimes \varepsilon_{B_j} = \varepsilon_1 = \tilde{q}(B_0, V_v). \quad (3.58)$$

Утверждение 3-9. Пусть $\exists V_1$, что

$$V_1 = B_0 \oplus \sum_{j=1}^n B_j \otimes \tilde{U}_j^k \oplus \sum_{u,j=1}^n B_{ju} \otimes \tilde{U}_j^k \otimes \tilde{U}_u^k \oplus \dots,$$

где $j \neq u$, $u, j = \overline{1, n}$, и $\exists \varepsilon \in F(R)$,

$$\varepsilon_1 = \tilde{q}(V_1, f(\tilde{U}_1^k, \tilde{U}_2^k, \dots, \tilde{U}_n^k)) \Rightarrow V_1 = f(\tilde{U}_1^k, \tilde{U}_2^k, \dots, \tilde{U}_n^k) + \varepsilon_1.$$

Тогда при

$$\text{Pos}(\varepsilon_{B_j} > \tilde{q}(B_j, 0)) > 0,5 \quad (3.59)$$

коэффициент из нечеткой модели исключается.

Доказательство. По свойству возможности превосходства [81]

$$\text{Pos}(\varepsilon_{B_j} > \tilde{q}(B_j, 0)) + \text{Pos}(\varepsilon_{B_j} < \tilde{q}(B_j, 0)) = 1.$$

Отсюда

$$\max(\text{Pos}(\varepsilon_{B_j} > \tilde{q}(B_j, 0)), \text{Pos}(\varepsilon_{B_j} < \tilde{q}(B_j, 0))) = \text{Pos}(\varepsilon_{B_j} > \tilde{q}(B_j, 0))$$

достигается при

$$\text{Pos}(\varepsilon_{B_j} > \tilde{q}(B_j, 0)) > 0,5.$$

Действительно, при выполнении этого условия коэффициент на фоне ошибки не различим и его можно исключить из модели как незначимый.

Если существует выборка из ответов эксперта в других точках факторного пространства, не принадлежащих исходной опросной матрице, меру адекватности расчетов по модели экспертному мнению можно проверить, вычислив следующие показатели:

$$J_1 = \frac{1}{r} \sum_{v=1}^r \text{Pos}(V_1 = V_v), \quad (3.60)$$

$$J_2 = \frac{1}{r} \sum_{v=1}^r \text{Nec}(V_1 = V_v), \quad (3.61)$$

где r – количество точек, не принадлежащих исходной опросной матрице.

Если аналогичную процедуру применить при наличии ранее опубликованной информации из независимых источников или специально проведенных экспериментов, то (3.60) и (3.61) служат уже для проверки степени адекватности расчетов по полиному, аппроксимирующему изучаемое явление.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

1. Предложенный в диссертации переход от выражений в терминах функций принадлежности к выражениям с аргументами (LR) -функций при построении алгоритмов нечеткого вывода позволил избежать «проклятия размерности». В связи с этим существенно облегчается последующее решение задач анализа и синтеза процедур аппроксимации экспертных знаний аналитическими выражениями.

2. Определение нечеткой метрики на множестве нечетких чисел (LR) -типа посредством нечеткой нормы, в отличие от существующих методических подходов, с одной стороны, обусловило метризацию многомерного нечеткого

пространства, а с другой, – ликвидировало неоднозначность определения расстояния между двумя состояниями объекта.

3. Разработан метод извлечения и структуризации экспертной информации на базе синтеза результатов, полученных в теории нечетких множеств и теории планирования экспериментов, позволивший описать обобщенное состояние СЛО в виде полиномиальных моделей. При этом коэффициенты соответствующего нелинейного полинома по сути содержат явные и неявные знания эксперта о внутренней логике рассматриваемой предметной области, связанной с функционированием СЛО и представленной продукционными правилами, описывающими причинно-следственные связи, определяющих порядок функционирования рассматриваемого объекта.

4. Введен новый класс нечетких моделей для количественного оценивания состояния СЛО, построенный на основе явных и неявных экспертных знаний, который позволяет специалистам, работающим в рассматриваемой предметной области, распространить методы теории планирования экспериментов на область теории нечеткой логики с возможностью формализации экспертных знаний аналитическими выражениями.

5. На основе дальнейшего развития нечетко-возможностного подхода и теории планирования экспериментов разработаны концепция и метод формализованного описания интуитивно-словесных и неявно заданных экспертных знаний о состоянии СЛО, которые позволяют использовать дополнительную неколичественную (вербальную) экспертную информацию для построения математических моделей оценивания состояния СЛО. Использование при этом накопленного профессионального опыта эксперта при эксплуатации конкретного СЛО с учетом неопределенностей его состояния и условий функционирования существенно повышает оперативность и обоснованность принимаемых управленческих и инженерных решений.

ГЛАВА 4. МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОЦЕНИВАНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ В ПРОСТРАНСТВАХ ЛИНГВИСТИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ

4.1 МЕТОДИКА КЛАССИФИКАЦИИ СОСТОЯНИЙ СЛО В ПРОСТРАНСТВАХ НЕЧЕТКИХ ПЕРЕМЕННЫХ

С учетом полученных в предыдущих главах материалов проведем уточное формальное представление решаемой в диссертации проблемы, которая ранее (в первой главе) была описана только на теоретико-множественном уровне детализации.

Дано: множество высказываний эксперта об отдельных компонентах состояния СЛО в виде продукционных правил с нечетко заданными лингвистическими переменными:

$$A_{ji} = \langle \text{Если } X_1 = \tilde{U}_{j1} \wedge X_2 = \tilde{U}_{j2} \wedge \dots \wedge X_n = \tilde{U}_{jn}, \text{ то } Y = \tilde{V}_j \rangle, \quad (4.1)$$

при $j = 1, \dots, 2^n$ в n -мерном нечетком пространстве. При этом значения факторов принадлежат терм-множествам в нечетких лингвистических шкалах

$$\begin{aligned} \tilde{U}_{j1} &\in T(X_1), \quad M_1 : T(X_1) \rightarrow F(\mathbb{R}^1), \quad 1 = 1, \dots, n \\ \tilde{V}_j &\in T(Y), \quad M_Y : T(Y) \rightarrow F(\mathbb{R}^1) \end{aligned} \quad (4.2)$$

в виде нечетких чисел (LR) – типа

$$\begin{aligned} M_1(\tilde{U}_{j1}) &= \hat{U}_{j1} = (\underline{U}_{j1}, \bar{U}_{j1}, \alpha_{j1}, \beta_{j1}, h_{j1})_{LR}, \\ M_Y(\tilde{V}_j) &= \hat{V}_j = (\underline{V}_{jk}, \bar{V}_{jk}, \alpha_{jk}, \beta_{jk}, h_{jk})_{LR}. \end{aligned} \quad (4.3)$$

Требуется: построить аппроксимирующую функцию (в общем случае аппроксимирующие функции, см. 6 главу диссертации))

$$\tilde{V} = f(\vec{U}, \vec{B}), \quad (4.4)$$

с помощью которой (которых) будет проводиться оценивание состояния СЛО. При этом данная функция должна в n -мерном пространстве лингвистических переменных удовлетворять условию следующего вида (4.5):

$$\sum_{j=1}^{2^n} (V_j - f(U_{j1}, \dots, U_{jn}, \vec{B}))^2 \rightarrow \min_{\vec{B} \in F(\mathbb{R}^k)}, \quad (4.5)$$

где U_{jl} – нечеткое число;

\hat{U}_{jl} – значение нечеткого числа;

$U_{\square jl}$ – терм-множества независимых переменных;

\tilde{V}_j – терм-множество переменной Y .

\vec{B} – вектор коэффициентов полинома;

$F(R^k)$ – нечеткое k – мерное пространство.

Математическая формулировка решаемой в диссертации проблемы в виде (4.1) – (4.5) требует соблюдения всех условий и ограничений, которых были приведены в предыдущих главах. Анализ (4.1)-(4.5) свидетельствует, что проблема количественного оценивания состояния СЛО в n -мерном пространстве нечетких переменных путем формализации экспертных знаний (4.1) решается на основе использования комбинированного метода построения модели, представленной функцией (4.4) в нечетком факторном пространстве (4.2), (4.3) при выполнении условия (4.5).

Ниже приведены соответствующие разделы методики извлечения, представления и формализации экспертных знаний в виде полиномиальных моделей с последующей проверкой их адекватности и применения при оценивании состояния СЛО.

4.1.1 Шкалы, выбираемые экспертом в системе «мягких измерений», для принятия решения о состоянии СЛО

Все рассматриваемые в диссертации СЛО являются объектами искусственного происхождения, поэтому изначально оценивание их состояния осуществляется с использованием соответствующих методов классификации. В технике для СЛО различают следующие классы состояний [1,130,138,140-143,214,215]: «работоспособное», «частично работоспособное», «неработоспособное», «аварийное», «катастрофическое», которые можно расположить на порядковой шкале.

В данном подразделе шкалирование рассматривается в рамках решения задачи класса А – извлечение экспертных знаний (п.1.5.3.3).

Теория шкалирования неразрывно связана с теорией меры и широко используется в современной теории нечетких множеств [2,4,6,12,15,16,27,30,36].

Одной из главных особенностей мягких измерений является использование слабых шкал – порядковых и номинальных как основы для выполнения мягких измерений и широко используются в экспертных системах поддержки принятия решений [13,14,47,47,60,61,162,269].

Методика классификации состояний СЛО в пространствах нечетких переменных предусматривает разработку экспертом шкал классов состояний [101,102,130,132,224,262]. Выбранным классам делегированы косвенные (вербальные и количественные), которые представляют реально наблюдаемые изменения свойств СЛО в процессе его эксплуатации. При этом изменяются количественные значения входных переменных, что приводит к изменению и зависимой переменной Y . Такая вербально-числовая шкала дает возможность перевода словесных высказываний эксперта в нечеткие числа и образует так называемое фактор-множество [183-186,268-270,272,278].

Важно отметить, что при таком варианте построенные шкалы обладают еще и свойством изменения во времени по мере изменения состояния СЛО в его жизненном цикле, то есть по своей сути являются *динамическими* [101,102,156,157,174,188]. Такое свойство дает эксперту возможность изменять границы нечетких интервалов классов состояний, не меняя делегированных им вербальных отличительных признаков.

Фактически из коммутативной диаграммы, представленной на рисунке 1.5 (глава 1, п.1.5.1) экспертом реализуется отображение $\vartheta: Y \rightarrow Y/\mathcal{E}$. При этом предпочтение о принадлежности наблюдаемого состояния СЛО отдается тому из классов состояния, к которому оно ближе.

Вопрос о доказательной возможности использования эксперта в качестве интеллектуальной информационной системы измерений в условиях неопределенности находит подтверждение также в теоретических выкладках главы 3.

Теоремами 3-1 и 3-2 (глава 3, параграф 3.2) доказано, что при параметрическом представлении нечеткого числа (LR)-типа метрика, введенная также в виде нечеткого числа, задает на множестве нечетких чисел нечеткое метрическое пространство, называемое нечеткой числовой прямой. Нечеткая метрика может быть введена (следствие 3-2) посредством нечеткой нормы на множестве нечетких чисел (LR)-типа. Тогда, в рассматриваемом нами контексте решения общей проблемы сам эксперт выступает на данном этапе в качестве «средства измерения» [239] и определяет различаемую им нечеткость. При этом моды терм-множеств классов разбиения шкалы признака на фактор-множестве Y/\bar{E} не ниже показателя нечеткости независимой переменной, рассчитываемого по формуле (2.33).

Формализация экспертных заключений и выводов в виде аналитических зависимостей позволяет получать количественные аналоги вербальных знаний экспертов. Следовательно, для моделирования изменений состояний СЛО или его элементов необходимы специальные шкалы признаков.

Для решения поставленных задач эксперт разделяет границы оппозиционной шкалы (определение 3-18) состояния СЛО объектов на участки, где он условным описательным характеристикам поставит в соответствие численные величины с нечеткими границами в виде нечетких чисел (LR)-типа. Примеры изменения вербальных характеристик состояний в виде таблицы рассматриваемого признака, которые были сформированы в соответствии с нечетко градуированными участками шкалы, показаны в таблице 4.1 для такого пространственно-распределенного объекта как дымовая труба металлургического завода [27,94,95,211].

Построенная таким образом шкала является психофизической шкалой [271], которая коррелируется со шкалой желательности [7] и широко используется при решении задач, где используются знания и интуиция эксперта. При этом нечеткость исходной информации обуславливает нечеткость предполагаемых выводов, а терм-множества возможных значений выходной переменной Y пересекаются по всей области определения. Так, например, на рисунке 4.1 в нечетком виде задана

выходная переменная Y – состояние дымовой трубы металлургического завода вместе со шкалой состояния СЛО [27,102,224].

Таблица 4.1 – Шкала расшифровки нечетких значений Y – агрегированного показателя состояния СЛО дымовой трубы для рисунка 4.1

Границы участка	Характеристика состояния	Косвенные признаки изменения состояния
0,75 и выше	<u>Нормальное эксплуатационное</u>	Основные и вспомогательные конструктивные элементы не имеют дефектов и повреждений. Эксплуатационные характеристики, конструктивная схема и прочностные характеристики материалов полностью соответствуют проектным. Деформации и повреждения практически отсутствуют. Показатель дефектности 0-20%.
0,875-0,625	<u>Стабильное</u>	Основные конструктивные элементы не имеют дефектов и повреждений. Отмечаются незначительные дефекты у вспомогательных элементов. Эксплуатационные характеристики, конструктивная схема и прочностные характеристики материалов полностью соответствуют проектным. Деформаций и повреждений нет. Показатель дефектности 20-30%.
0,75-0,5	<u>Нестабильное</u>	Имеются незначительные дефекты и повреждения как у основных, так и вспомогательных конструктивных элементов. Эксплуатационные характеристики и конструктивная схема в основном соответствуют проектным. Отмечается снижение прочностных характеристик материалов и незначительные деформации. Показатель дефектности 30-40%.
0,625-0,375	<u>Крайне нестабильное</u>	Имеются отдельные дефекты у основных и значительные повреждения у вспомогательных конструктивных элементов. Отмечается несоответствие эксплуатационных условий, конструктивной схемы и прочностных характеристик материалов проектным. Отмечаются деформации и повреждения. Показатель дефектности 40-50%.
0,5-0,25	<u>Предавварийное</u>	Имеются значительные дефекты и повреждения как у основных, так и у вспомогательных конструктивных элементов. Эксплуатационные условия, конструктивная схема и прочностные характеристики не соответствуют проектным. Отмечаются значительные деформации и повреждения основных конструктивных элементов. Показатель дефектности 50-60%.
0,375-0,125	<u>Аварийное</u>	Имеются значительные дефекты и повреждения у основных и вспомогательных конструктивных элементов, несоответствие эксплуатационных условий и конструктивной схемы проектным. Прочностные характеристики материалов несущих конструкций не соответствуют проектным. Наблюдаются значительные деформации и разрушения. Показатель дефектности 60-70%.
0,25 и ниже	<u>Естественное разрушение</u>	Имеются многочисленные дефекты как у основных, так и вспомогательных конструктивных элементов. Эксплуатационные характеристики и конструктивная схема не соответствуют проектным. Прогрессирующий рост деформаций и разрушений. Показатель дефектности 70-90%.

При этом в таблице 4.1 задана шкала расшифровки нечетких значений Y – агрегированного показателя состояния СЛО дымовой трубы для рисунка 4.1.

Разработанная шкала позволяет переводить вербальные характеристики эксперта в численный вид.

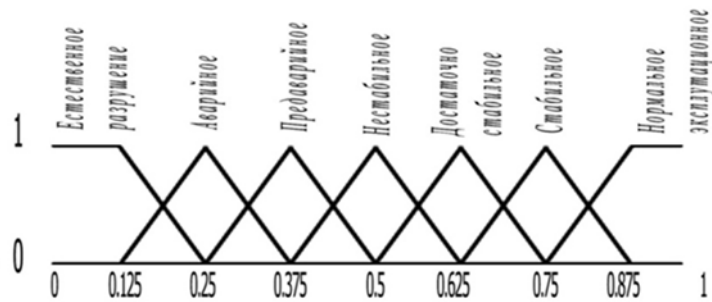


Рисунок 4.1 – Представление Y в виде лингвистической переменной как графическое отражение таблицы 4.1

Шкала позволяет также сравнивать полученные результаты с нормативной базой и оценками по модели оценивания состояния СЛО в количественном виде.

4.1.2 Оценивание состояний СЛО функциями принадлежности специального вида

Рассматриваемое исследование относится к решению задач класса А – создание и обоснование вербально-числовых шкал для моделирования изменений состояний СЛО и задач класса Г – извлечение экспертных знаний, а именно, методическое обеспечение оценивания качества разработанного модельно-алгоритмического аппарата.

При практических расчетах важным является алгоритмизированный процесс априорного оценивания несмещенности и эффективности получаемых результатов. Обычно такие расчеты проводят на основе использования функций принадлежности специального типа [140,141,240,244].

Не теряя общности, исследование перечисленных выше задач А и Г проведем на примере нечеткой линейной регрессии следующего вида:

$$\tilde{y} = \sum_1^n \tilde{a}_i x_i + \xi, \quad (4.6)$$

где \tilde{Y} , \tilde{a}_i – нечеткие значения зависимой переменной и коэффициентов регрессионной модели.

Для коэффициентов $\tilde{a}_i, i = 1 \dots n$ и значений \tilde{Y} функциями принадлежности (LR)-типа служат выражения:

$$\mu_{\tilde{a}_i}(a_i) = \begin{cases} 1 - \frac{|b_i - a_i|}{c_i}, & b_i - c_i < a_i < b_i + c_i \\ 0, & \text{в противном случае;} \end{cases} \quad (4.7)$$

$$\mu_{\tilde{y}}(y) = \begin{cases} 1 - \frac{|b_y - y|}{c_y}, & b_y - c_y < y < b_y + c_y, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (4.8)$$

В работе [141] доказано следующее утверждение:

Утверждение 4.1. Нечеткое множество \tilde{Y} в условиях (4.6), (4.8) имеет функцию принадлежности:

$$\mu_{\tilde{y}}(y) = \begin{cases} 1 - \frac{|\sum b_i x_i - y|}{\sum c_i |x_i|}, & b_y - c_y < y < b_y + c_y, \\ 0, & \text{в противном случае;} \end{cases} \quad (4.9)$$

где $b_y = \sum_{i=1}^n b_i x_i, c_y = \sum_{i=1}^n c_i |x_i|$.

Применительно к условиям моделирования по разработанному выше в главах 2 и 3 методу, когда все независимые переменные центрированы и колеблются в интервале $[-1, +1]$, по аналогии с (4.9) сформулируем следующее утверждение.

Утверждение 4.2. В условиях

$$\tilde{Y} = \sum_1^n b_i x_i + \sum_{u,j=1}^n b_{uj} x_u x_j + \dots + \xi$$

функция принадлежности имеет вид

$$\mu_{\tilde{y}}(y) = \begin{cases} 1 - \frac{|b_y - y|}{\sum |b_i| |c_i|}, & b_y - c_y < y < b_y + c_y, \\ 0, & \text{в противном случае;} \end{cases} \quad (4.10)$$

где $b_y = \sum_{i=1}^n b_i x_i + \dots,$

$$c_y = \sum_{i=1}^n |b_i| c_i;$$

$$x_i - c_i < \tilde{x}_i < x_i + c_i.$$

Если под моделью понимать не только линейную регрессию, а любое аналитическое выражение, например, полином любой степени, то утверждение 4.2 реализует идею того, что верхней границей нечеткости c_y является сумма вкладов нечеткостей c_i , пропорциональная вкладу значений соответствующих переменных x_i в общую вариацию зависимой переменной y . При этом с достаточной общностью можно утверждать, что малый вклад независимой переменной x_i в общую вариацию зависимой переменной не должен существенно влиять на ее суммарную нечеткость.

На основании проведенного анализа можно сделать однозначный вывод о том, что эксперт на основании своих знаний и опыта может проводить достоверные оценки принадлежности состояния СЛО к определенному классу его состояний, используя свой статус как «интеллектуальной информационно-диагностической системы» [239].

4.2 ФОРМАЛИЗАЦИИ ЭКСПЕРТНОЙ ИНФОРМАЦИИ ПОЛИНОМИАЛЬНЫМИ МОДЕЛЯМИ

Решается задача класса В – формализация экспертных знаний, которая включает задачи классов А и Б, поименованных в п. 1.5.3.3. Информация, которая действительно необходима для лица, принимающего решение, должна быть системной, емкой, компактной, не быть избыточно подробной и в то же время давать для лица, принимающего решение, полное представление о нем на данный момент. Иными словами, исходная информация требует предварительной обработки в виде некоторых сверток, и лучше всего, если переменные будут агрегированными. Так появляется настоятельная необходимость представления интеллектуальной деятельности человека, например, полиномиальными моделями, как показано в предыдущих главах.

4.2.1 Алгоритм построения полиномиальной модели в пространстве лингвистических переменных

Алгоритм построения полиномиальной модели агрегированного (обобщенного) состояния СЛО [259] показан на рисунке 4.2. Он является обобщением результатов исследований по *извлечению, представлению и формализации* явных и неявных экспертных знаний.

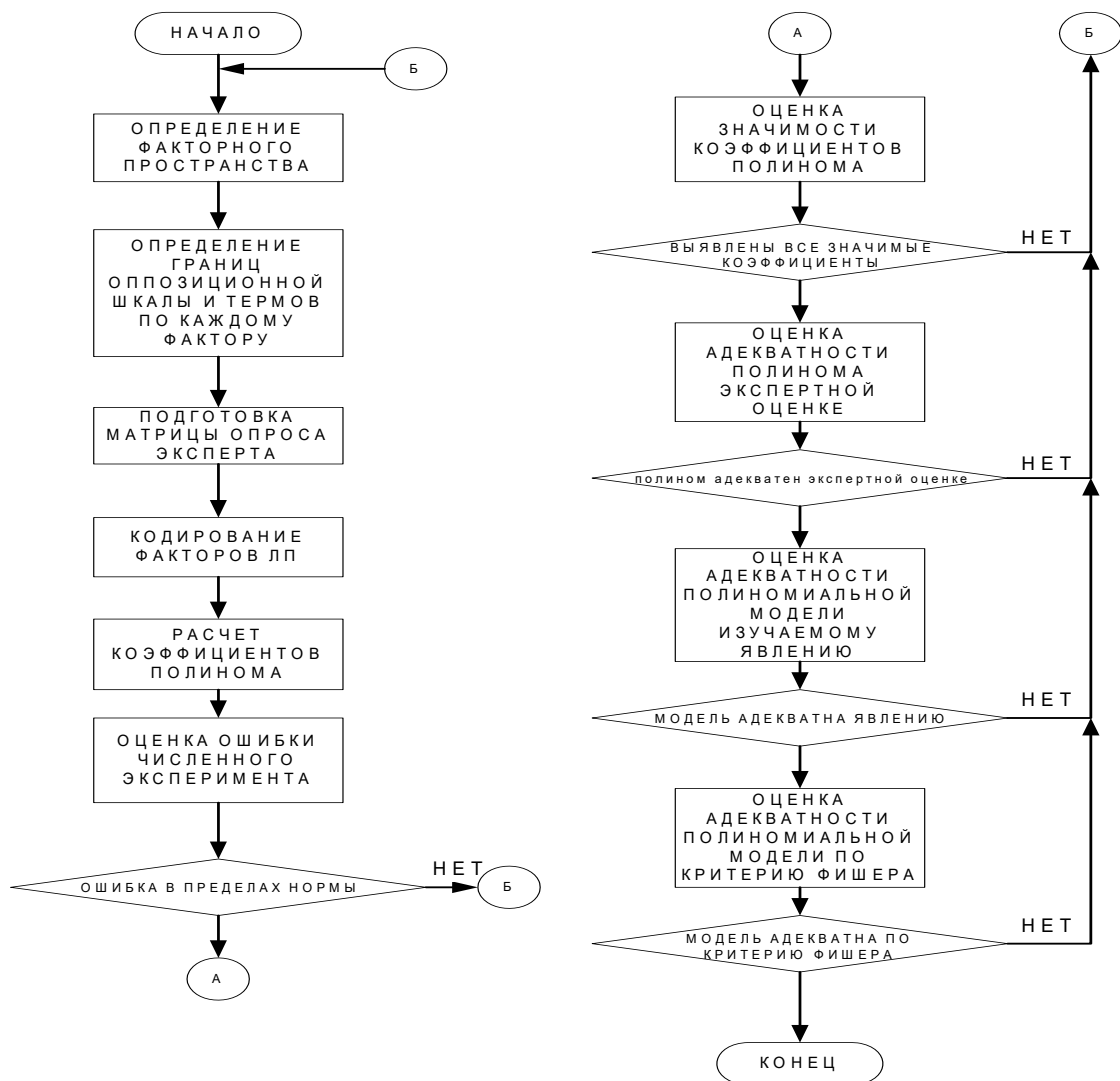


Рисунок 4.2 – Алгоритм построения математической модели оценивания состояния СЛО на основе явных и неявных экспертных знаний

Методика экспертного оценивания состояния СЛО в многомерном пространстве нечетких переменных, реализующая алгоритм, представленный на рисунке 4.2, из предполагает последовательное решение задач классов А, Б, В и Г.

Проведем дальнейшую детализацию алгоритма, представленного на рис. 4.2.

1. Определение факторного пространства (см. рисунок 4.2) – важнейший из этапов разработки эффективной модели.

Фактически на данном этапе решается задача класса А (рисунок 1.12) – извлечение экспертных знаний в виде нечетких лингвистических переменных.

Поскольку эксперты могут отдавать предпочтение различным переменным, то их работа должна включать в себя обязательные шаги:

- определение максимально большого числа количественных и неколичественных переменных, характеризующих состояние СлО;
- выделение среди них существенно влияющих на состояние СлО в целом;
- выбор и обоснование наиболее значимых (предпочтительных) переменных для построения модели оценивания состояния СлО или его составных частей определяет факторное пространство, которое должно характеризовать состояние оцениваемого СлО с различных сторон, то есть системно;
- количество переменных для построения модели составляет 7 ± 2 [309], что обусловлено психофизическими особенностями эксперта-человека;
- увеличение количества переменных факторного пространства возможно за счет включения переменных, которые входят в модели низшего уровня иерархии моделей, что при многоуровневой иерархии позволяет строить модель оценивания состояния СлО сколь угодно большой размерности;
- количество выходных переменных Y_j зависит от постановки задачи и для каждой из них целесообразно построить свою модель;
- кодирование факторов – перевод значений лингвистических переменных в стандартизованный масштаб;
- заполнение матрицы экспертом – экспертное оценивание по всем нечетким продукционным правилам в лингвистическом виде, то есть по всем строкам опросной матрицы.

2. Процедура представления (задача класса Б) фактора лингвистической переменной фактически устанавливает переход между лингвистическими и количественными шкалами (рисунок 4.1). Поэтому определение границ

оппозиционных шкал для каждой из неколичественных и/или количественных переменных (задача класса А) выступает важным этапом в решении задачи класса Б и в общей системе построения моделей (задача класса В), имеет свои особенности, проводится индивидуально и включает в себя:

- определение количественной или неколичественной оценки нижней и верхней границ нечеткой оппозиционной шкалы по каждой переменной;
- количество терм-множеств как делений лингвистической шкалы признака удобнее выбирать нечетным для определения центра шкалы в явном виде;
- определение степени нечеткости («размытости») понятия, то есть определение значений мод, а также коэффициентов нечеткости слева α и справа β для всех мод термов, например, как показано на рисунках 4.3 и 4.4;

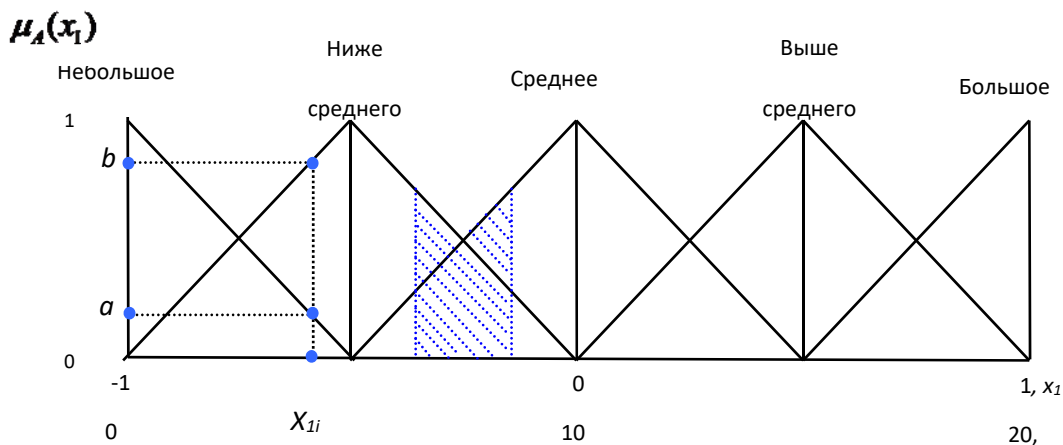


Рисунок 4.3 – Определение значений на шкале лингвистической переменной

- у неколичественных лингвистических переменных концы оппозиционной шкалы маркируются -1 и $+1$, при этом «0» соответствует высказываниям типа «ни да, ни нет» (рисунок 4.3);
- для количественных лингвистических переменных далее проводится кодирование – перевод в стандартизованный масштаб (подробнее см. ниже п.3).

Поясним рисунок 4.3 с точки зрения интерпретации нечётких шкал. Фактически по оси абсцисс расположены три шкалы: во-первых, лингвистическая

(верхняя шкала терм-множеств: «Небольшое – Большое») для представления знаний эксперта при проведении оценивания ситуации; во-вторых, естественная шкала признака X_1 от 0 до 50 для перевода лингвистических значений переменной в числовые (процесс арифметизации), и, в-третьих, шкала в кодированных значениях на интервале $[-1,+1]$, необходимая для реализации методов теории планирования экспериментов. Ось ординат содержит функцию принадлежности $\mu_A(x_1) \in [0,1]$ как меру степени уверенности («правильности») перевода из одной шкалы в другую.

Как показано на рисунке 4.3, значению X_{li} на оси ординат соответствуют значения функции принадлежности $\mu_A(x_1)$ a и b . Поскольку $b > a$, то значение X_{li} расположено ближе к моде терм-множества «Ниже среднего». Если X_{li} относится к заштрихованной зоне, где значения $\mu_A(x_1) \approx 0,5$ и нельзя отдать предпочтение какой-либо из мод данного интервала, лингвистическая переменная примет значение между терм-множествами «Ниже среднего» – «Среднее».

Иной вид имеют неколичественные (вербальные) лингвистические переменные (рисунок 4.4). Рассмотрим, например, лингвистическую переменную – климатический фактор.

Поскольку переменная носит явно выраженный неколичественный смысл, а на концах оппозиционной шкалы при заполнении опросной таблицы она принимает значения только $\{-1,+1\}$, то в процессе оценки в реальной ситуации эксперт не может назначать любые значения из интервала $[-1,+1]$.

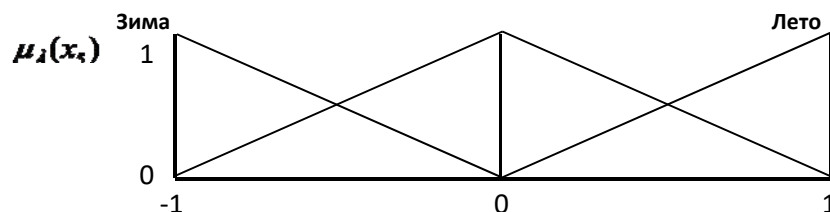


Рисунок 4.4 – Неколичественная лингвистическая переменная

3. Подготовка опросной матрицы (задача класса В – формализация экспертных явных и неявных экспертных знаний) – осуществляется после определения и выбора лингвистических переменных, образующих факторное пространство. Этот этап полностью формализован и требует работы только инженера по знаниям, поэтому его проведение возможно и без привлечения эксперта. Строкам опросной матрицы соответствуют знания экспертов, которые представлены нечеткими продукционными правилами. Порядок формирования типовых матриц для различного количества переменных для полного факторного эксперимента и дробных реплик от него описан в работах [7,150].

Вид опросной матрицы при планировании полного факторного эксперимента типа 2^5 представлен фрагментом в таблице 4.2.

Здесь в столбцах матрицы таблицы 4.2 приведены соответственно:

1 – номера продукционных правил по порядку;

2-6 – входные переменные факторного пространства;

7 – столбец Y оценок эксперта в лингвистическом виде по шкале рисунка 4.1.

Заметим попутно, что общее число столбцов выходных переменных Y_j опереляется экспертом для характеристики объекта в рамках решения поставленной задачи в выбранном факторном пространстве.

Обычно ту же матрицу представляют с меньшей степенью детализации, маркируя концы шкал по всем входным переменным значениями «- 1» и «+1». Детальное описание действий эксперта в данном конкретном случае представлено в главе 5 (п.5.4).

При выборе вида опросной матрицы исходят из следующих положений:

- минимизация количества обращений к эксперту достигается использованием дробных реплик типа $N = 2^{n-p}$, где n – число факторов, p – степень дробности полного факторного эксперимента [150];

- степень дробности понижают обычно не до «сверхнасыщенности» опросной матрицы, чтобы при необходимости имелась возможность по определяющему контрасту разделить факторы взаимодействия [7,150];

Таблица 4.2 – Матрица опрашиваемых ситуаций и ответов эксперта (фрагмент)

№ п/п	Уровень деформации стяжных колец	Ширина раскрытия трещин	Градиент раскрытия трещин	Градиент изменения общего количества дефектов	Материал наружной стенки ствола	Обобщенный параметр оценки технического состояния (ОПТС)
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	Y
1	2	3	4	5	6	7
1	<i>Низкий</i>	<i>Низкий</i>	<i>Низкий</i>	<i>Низкий</i>	<i>Кирпич М200</i>	<i>Норм. <u>экспл.</u></i>
2	<i>Высокий</i>	<i>Низкий</i>	<i>Низкий</i>	<i>Низкий</i>	<i>Кирпич М200</i>	<i>Стабильное</i>
3	<i>Низкий</i>	<i>Высокий</i>	<i>Низкий</i>	<i>Низкий</i>	<i>Кирпич М200</i>	<i><u>Дост. стаб.</u></i>
4	<i>Высокий</i>	<i>Высокий</i>	<i>Низкий</i>	<i>Низкий</i>	<i>Кирпич М200</i>	<i>Нестабильное</i>
...
...
28	<i>Высокий</i>	<i>Высокий</i>	<i>Низкий</i>	<i>Высокий</i>	<i><u>К/уп. Кирпич</u></i>	<i>Аварийное</i>
29	<i>Низкий</i>	<i>Низкий</i>	<i>Высокий</i>	<i>Высокий</i>	<i><u>К/уп. Кирпич</u></i>	<i><u>Дост. с Стаб.</u></i>
30	<i>Высокий</i>	<i>Низкий</i>	<i>Высокий</i>	<i>Высокий</i>	<i><u>К/уп. Кирпич</u></i>	<i>Нестабильное</i>
31	<i>Низкий</i>	<i>Высокий</i>	<i>Высокий</i>	<i>Высокий</i>	<i><u>К/уп. Кирпич</u></i>	<i>Аварийное</i>
32	<i>Высокий</i>	<i>Высокий</i>	<i>Высокий</i>	<i>Высокий</i>	<i><u>К/уп. Кирпич</u></i>	<i><u>Ест. разруш.</u></i>

- обычно предполагают [224,239], что количество обращений к эксперту не должно быть слишком большим, при этом количество строк матрицы $N \leq 64$ считается вполне допустимым, откуда можно получить степень дробности полного факторного эксперимента p ;

- представлять опросную матрицу эксперту целесообразнее в рандомизированном порядке строк (продукционных правил), например, по номерам. Условие рандомизации является одним из основополагающих требований при использовании статистических методов [150,151];

- эксперт предварительно должен быть уведомлен о том, что возможные некорректности заполнения столбца Y матрицы обязательно проявятся в процессе построения модели и их легко можно будет устранить на следующей итерации моделирования.

4. Кодирование факторов, согласно требованиям теории планирования экспериментов, заключается в преобразовании (арифметизации) лингвистической

шкалы названий на интервале $[-1,+1]$. Данный этап может выполняться инженером по знаниям без участия эксперта и его содержание состоит в следующем:

- количественные лингвистические переменные (рисунок 4.3), с учетом доказанной возможности кодирования нечетких переменных (см. (3.35) и (3.36)) и применения дополнительных арифметических операций (см. глава 2, п. 2.2.1), удобнее кодировать по формулам

$$x_i = (X_i - X_{cp}) / h, \quad (4.11)$$

где X_i – значение переменной на шкале признака;

$X_{cp} = (X_{max} + X_{min}) / 2$ – средняя точка шкалы;

$h = (X_{max} - X_{min}) / 2$ – интервал варьирования;

- концы неколичественных лингвистических переменных (см. рисунок 4.4) маркируют -1 и $+1$, при этом точка «0» соответствует лингвистическому определению середины шкалы (ни «да», ни «нет»), если она имеет смысл в той предметной области, где используется конкретный Сло.

5. Заполнение матрицы при решении задач класса А является наиболее ответственным этапом для эксперта, поскольку указанная операция напрямую отражает его профессиональные знания и накопленный опыт по данному конкретному изучаемому явлению. При этом следует обратить внимание эксперта на следующие существенные особенности процедуры заполнения опросной матрицы:

- небрежно оцененные продукционные правила (строки опросной матрицы таблицы 4.2) ведут к неправильным результатам получения коэффициентов и, как следствие, расчетных значений по полиному, которые сравниваются затем с экспертными в конце данной итерации;

- неточности при оценке Y в любой строке обязательно выявляются в конце каждой итерации, и эксперт должен быть психологически готов к такому исходу, тем более что при этом всегда существует возможность исправления ошибок путем корректировки оценок;

- количество итераций зависит от степени правильности вносимых корректировок и понимания экспертом общей стратегии проводимого эксперимента;

- за экспертом всегда остается право прекратить процедуру построения модели на определенное время для упорядочения своих знаний согласно основному требованию метода – системности проводимых оценок.

6. Из методических и психологических соображений порядок полиномиального разложения выбран равным 3. Здесь учтено то обстоятельство, что вклад эффектов взаимодействия выше третьего порядка в общую вариацию Y пренебрежимо мал [7,150,223].

Расчет коэффициентов предлагаемого полинома (см. формулу (3.52), глава 3) заключается в переводе зависимых лингвистических переменных (Y) путем арифметизации в четкую количественную шкалу с последующими действиями с матрицей опроса в рамках методов теории планирования экспериментов [224,259]. Данная процедура представляется возможной только благодаря введению дополнительных арифметических операций и других действий, описанных в 2 и 3 главах данной диссертации. При этом главным основным в указанных действиях является возможность сохранения исходной нечеткости при работе с массивами нечетких чисел (LR)-типа, количество которых определяется строками опросной матрицы.

Поскольку значения независимых переменных на концах нечеткой оппозиционной шкалы принимают точные значения $\{-1, +1\}$ (глава 3) и применяются введенные дополнительные арифметические операции (глава 2), то формулы для определения коэффициентов b_j примут следующий вид [150, 223]:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ij} Y_i}{N}, \quad (4.12)$$

где N – число строк опросной матрицы (число продукционных правил);

x_{ij} , Y_i – соответственно значения i -й строки независимой и зависимой переменных для j -го столбца вычислительной матрицы; $i = \overline{1, N}$; $j = \overline{1, f}$;

$f = Q - k$ – количество значимых коэффициентов разложения полинома;
 $Q = 1 + C^1_n + C^2_n + C^3_n$ – общее количество коэффициентов разложения полинома 3-й степени;

k – количество незначимых коэффициентов полинома.

Следует еще раз подчеркнуть, что, как показано в главе 2, за счет применения дополнительных арифметических операций сохраняется исходная нечеткость переменной Y при вычислениях по большому массиву нечетких чисел (LR)-типа.

Данный этап может выполняться без присутствия эксперта.

7. Для оценивания значимости коэффициентов полинома (задачи класса В) определяют каким-либо возможным методом ошибки численного эксперимента, при этом возможно применение следующих подходов:

- априорно на основании статистической обработки данных [7,150];
- с использованием знаний эксперта, например, по формуле (2.33) $d(A)$ – коэффициентам нечеткости;
- оцениванием несмещенности центра планирования (п.3.7) путем сравнения значения свободного члена полинома b_0 с независимой оценкой мнения эксперта в центре планирования факторного пространства.

8. Общее количество коэффициентов полинома третьей степени Q может составлять несколько десятков. Поэтому необходима разработка соответствующих критериев для дискриминации незначимо отличающихся от нуля коэффициентов. В рамках алгоритма создания моделей [259] возможно применение следующих процедур:

- оценка значимости коэффициентов стандартной процедурой по t -критерию Стьюдента [104,137] в виде

$$t = b_j / s_{b_j},$$

где s_{b_j} – ошибка определения коэффициентов полинома (см. пункт 7);

- при аппроксимации мнения эксперта, когда факторное пространство содержит неколичественные переменные или адекватная оценка состояния СЛО по модели в количественном выражении невозможна, то достаточно адекватность

оценивается ситуационно без определения количества значимых коэффициентов по Стьюденту (подробнее см. ниже, пункт 4.6);

- процесс следует считать законченным, когда в каждой строке опросной матрицы достигается необходимая степень соответствия результатов расчетов, связанных с оцениванием состояния СЛО и проводимых с использованием построенного полиномиальному выражения, и результатов, характеризующих действительное состояние СЛО. Иными словами, разность между рассчитанными по полиному значениями и текущими экспертными оценками реального состояния СЛО не должны превышать уровень исходной нечеткости зависимой переменной.

9. Процесс оценивания адекватности результатов вычислений, проводимым по сформированному полиному со значимыми коэффициентами, и результатов, полученных экспертным путем, является итерационным. При этом работа с экспертом заключается в следующем:

-если некорректности заполнения столбца Y матрицы таблицы 4.2, когда разности по некоторым строкам $\Delta_i = Y_{i\text{эксп}} - Y_{i\text{расч}}$ ($Y_{i\text{эксп}}$ – оценка эксперта; $Y_{i\text{расч}}$ – расчетное значение по i -й строке опросной матрицы) оказываются большими нечеткости зависимой переменной, то в этом случае они обязательно корректируются экспертом, при этом все коэффициенты рассчитываются заново по принятой схеме алгоритма (рисунок 4.2), а итерационный процесс продолжается до достижения необходимой степени согласия;

- далее для достижения компактности уравнения возможно удаление наименьших по абсолютной величине коэффициентов, после чего рассчитывают остаточную дисперсию для нового полинома и продолжают процесс отбрасывания до тех пор, пока остаточная дисперсия еще может уменьшаться или остается в приемлемых границах точности

$$S^2_{\text{ост}} = \sum_{i=1}^N (Y_{i\text{эксп}} - Y_{i\text{расч}})^2 / (N - f), \quad (4.13)$$

где N – количество строк опросной матрицы;

f – число налагаемых связей (количество коэффициентов разложения полинома, отобранных для вычисления);

- другим независимым методом служит оценка по алгоритму «необходимость-возможность» [81]– NEC-POS (подробнее см. ниже п.4.2.3).

10. Необходимая степень адекватности формализованной модели изучаемому явлению в целом достигается:

- сравнением расчетных значений по полиному и фактических данных (натурных, экспериментальных, по литературным источникам и т.д.), не вошедших в исходную выборку, по формуле:

$$S^2_{ад} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (Y_{j\text{лит}} - Y_{j\text{расч}})^2, \quad (4.14)$$

где $S^2_{ад}$ – дисперсия адекватности;

$Y_{j\text{лит}}$ – значения из независимой выборки по литературным или экспериментальным данным;

$Y_{j\text{расч}}$ – расчетное значение по полиному (4.7);

m – объем независимой выборки.

Проверка однородности дисперсий проводится по критерию Фишера:

$$F_{расч} = S^2_{ад} / S^2_{ош}, \quad (4.15)$$

где $S^2_{ош}$ – квадрат ошибки измерения Y , принятой в данной области изучаемого явления.

Если $F_{расч} < F_{табл}$ при соответствующем числе степеней свободы, то расчеты по полиному следует считать адекватными.

Согласно теории планирования экспериментов, разработанная методика позволяет уменьшить количество обращений к эксперту [7,27,150,224] и аппроксимировать согласованное нечеткое отображение второго рода аналитической функцией на словесных значениях лингвистических переменных и, тем самым, существенно упростить решение задачи с вычислительной точки зрения (глава 3).

Порядок применения данной методики и алгоритма для построения прогностических моделей приведен далее в главах 5 и 6, а также в Приложении ПЗ, и проиллюстрирован на примерах оценивания состояния СЛО из различных областей науки и техники. Разнообразие выбранных для исследования объектов

объясняется стремлением диссертанта продемонстрировать универсальность и эффективность разработанных методов извлечения, представления, формализации и использования явных и неявных знаний экспертов для оценивания состояния СЛО в различных предметных областях [27,223,259].

4.3 ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ АДЕКВАТНОСТИ ПОЛИНОМИАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ОЦЕНИВАНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ СЛО

В широком смысле количественное оценивание адекватности подразумевает целую систему независимых проверок соответствия результатов расчетов, проводимых с использованием построенных модели оценивания состояния СЛО во всём диапазоне изменения переменных, действительному состоянию СЛО. Фактически решается ряд задач класса В, связанных с исследованием качества построенных моделей оценивания состояния СЛО на основе разработки и использования критериев проверки степени адекватности результатов, полученных с использованием модели, и результатов, полученных путем обработки мнений эксперта о действительном состоянии СЛО.

В вопросах оценки адекватности [2,17-19,58,59,92,175,176,224, 240,241,259] традиционным способом является сравнение расчетных и экспериментальных данных, например, с оценкой по остаточной дисперсии, как показано выше в п.4.1 (пункты 9 и 10) предложенного алгоритма (рисунок 4.2).

Отметим, однако, что наиболее приемлемым случаем следует считать оценивание с использованием нескольких независимых критериев проверки гипотезы адекватности. При этом реализуются следующие процедуры [27,58-60]:

- оценивание ошибки численного эксперимента;
- оценивание значимости коэффициентов модели;
- оценивание адекватности полинома знаниям эксперта;
- оценивание адекватности расчетов по построенному уравнению количественным или ситуационным данным состояния СЛО по независимым выборкам или литературным источникам.

Подчеркнем, что только при выполнении условий адекватности полученное полиномиальное выражение со значимыми коэффициентами разложения можно считать *моделью оценивания состояния СЛО* [224,262]. Примеры такого анализа представлены в главах 5,6 и Приложении ПЗ.

4.3.1 Процедуры оценивания значимости коэффициентов полинома

Результаты ранее проведенных исследований показывают [5,27,34-36,39,44,59,188,259], что многие переменные, используемые при оценивании состояния СЛО, являются вербальными, органолептическими, то есть нечёткими по своей сути. К сожалению, формализованные подходы к описанию погрешностей измерения переменных в таких случаях просто отсутствуют, но степень этой нечёткости можно оценивать хотя бы приближенно на основе знаний эксперта [27,259].

Оценка ошибки численного эксперимента производится для последующей процедуры оценивания значимости коэффициентов полинома и может определяться несколькими независимыми методами, как уже было показано в п.4.1.

При этом предлагается оценивание правильности статистического центрирования зависимой переменной Y проводить путем сравнения величины b_0 с оценкой эксперта в факторном пространстве состояния СЛО:

$$s_{\text{ош}} = f(b_0 - \bar{y}) \quad (4.16)$$

где b_0 – свободный член в разложения полинома;

\bar{y} – оценка эксперта в центре планирования.

Обе участвующие в (4.16) характеристики независимы, поскольку эксперт, как правило, не может предугадать, какое значение примет b_0 в результате построения полинома.

В условиях отсутствия ошибки эксперимента представление о величине порога значимости коэффициентов полиномиального разложения можно получить, реализуя одну из следующих процедур:

- выбрать начальный уровень порога $0,01 b_0$;

- провести итерацию вычислений текущего порога значимости коэффициентов в виде:

$$r_{zn.} = 0,01 r b_0, \quad (4.17)$$

где r – целые положительные числа;

- обнулить коэффициенты, удовлетворяющие условию

$$b_i \leq 0,01 r b_0, \quad (4.18)$$

и вычислить значения зависимой переменной Y на новом множестве разложений со всеми критериальными оценками по разработанной методике.

Полезным является расчет «зоны нечувствительности» основного показателя при существующем метрологическом обеспечении оценивания состояния объекта s^2_{ou} как функции суммарных ошибок определения состояния СЛО.

Объективным методом оценки интервала некоррелированности двух разнесенных во времени значений переменных является автокорреляционная функция [54,223,231]. Если значения измеряемых входных и выходных параметров рассматривать как случайный процесс, развивающийся во времени, то найденное распределение автокорреляционной функции определяет время инерционности процесса, когда система еще «помнит свое прошлое».

Схема методики построения математических моделей в нечеткой среде, согласно приведенному алгоритму (рисунок 4.2), показана на рисунке 4.5. Методика объединяет решение всех сформулированных в п. 1.5.3.3 классов задач – А, Б, В и Г.



Рисунок 4.5 – Схема методики экспертного оценивания состояния СЛО в нечетком пространстве

4.3.2 Критерии оценки адекватности расчетов состояния СЛО экспертным знаниям

Оценивание адекватности полученного полинома экспертным знаниям о состоянии СЛО в нечёткой среде проводится в рамках решения задач В (см. п. 1.5.3.3) [27,58,61,175,176,259].

В этом случае суть процесса оценивания адекватности расчетов по полиному со значимыми коэффициентами экспертным оценкам заключается в следующем:

- если в строках опросной таблицы выполняется условие

$$Y_{\text{эксн.}} - Y_{\text{расч.}} > Y_{\text{Sou}}, \quad (4.19)$$

где $Y_{\text{эксн.}}$, $Y_{\text{расч.}}$ – соответственно значения независимой переменной по экспертным данным и рассчитанные по полиному, Y_{Sou} – ошибка определения Y , то эксперт должен устранить возникшее несоответствие. Все расчетные процедуры повторяются до достижения адекватности всего полиномиального выражения мнению эксперта;

- для достижения компактности полиномиального разложения со значимыми коэффициентами целесообразно дополнительно провести удаление наименьших по абсолютной величине коэффициентов приемлемой величины остаточной дисперсии (4.8) при условии

$$Y_{\text{эксн.}} - Y_{\text{расч.}} < 0,5d(A_y), \quad (4.20)$$

где $d(A_y)$ – коэффициент нечёткости по Y в виде (2.33), по всем строкам матрицы опроса.

Другим независимым методом служит оценка по Дюбуа-Праду [81]: экспертное решение низшего или высшего решения по шкале признака

$$Pos(Y_{i\text{эксн.}} = Y_{i\text{расч.}}) > Pos(Y_{i\text{эксн.}} > < Y_{i\text{расч.}}), \quad (4.21)$$

с вычислением общего показателя по точкам факторного пространства:

$$\frac{1}{r} \sum_{l=1}^r Pos(Y_{l\text{эксн.}} = Y_{l\text{расч.}}), \quad (4.22)$$

где r – количество значений, не вошедших в исходную матрицу построения модели.

При значении общего показателя $>0,5$ модель считается адекватной [81,282].

При наличии ответов эксперта в других точках факторного пространства адекватность нечеткой модели можно проверить, вычислив следующие показатели (глава 3):

$$\frac{1}{r} \sum_{i=1}^r Pos(V_1 = V_k), \quad (4.23)$$

$$\frac{1}{r} \sum_{i=1}^r Nec(V_1 = V_k), \quad (4.24)$$

где r количество точек факторного пространства, не вошедших в исходную выборку.

Учитывая (4.18), (4.19), будем считать модель адекватной, если выполняется следующее условие:

$$Pos(V_1 = V_k) > Pos(V_1 \neq V_k), \quad (4.25)$$

$$V_k = M(B_k), V_k = F(R).$$

При этом получим усредненное значение адекватности нечеткой аналитической аппроксимации при наличии ответов эксперта в r точках факторного пространства. При значении показателя $> 0,5$ модель считается адекватной [81].

Результаты сравнения адекватности оценок состояния СЛО, рассчитанных с использованием модели, и оценок, полученных на основе обработки мнений экспертов, целесообразно представлять корреляционным полем точек с визуализацией на графике (рисунок 4.6) с координатными осями: абсцисса – фактические (экспертные) оценки, ордината – расчетные по полиному значения.

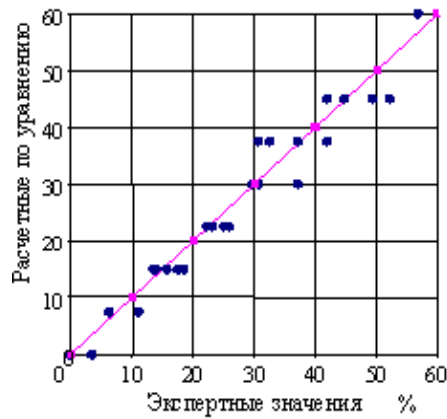


Рисунок 4.6 – Корреляционное поле точек экспертных оценок и расчетных по полиному

При этом группировка точек вокруг теоретической линии регрессии – биссектрисе прямого угла, проходящей под 45° , – свидетельствует дополнительно об отсутствии систематических ошибок, а коэффициент корреляции о силе линейной связи [224].

Оценка адекватности формализованной модели заключается:

- в сопоставлении расчетных значений параметров, характеризующих состояние СЛО и полученных с использованием полинома, и фактических (литературных или экспериментальных) значений параметров состояния СЛО, полученных традиционными статистическими методами, при этом важным требованием выступает независимость выборки, составленной по экспериментальным или литературным данным из не вызывающих сомнения источников;

- приемлемыми выступают все способы оценки адекватности, изложенные в п. 4.2.3;

- важным является сопоставление полученных результатов с вычислениями, выполненными другими методами, например, в виде степени согласия по коэффициентам конкордации [17,18,104].

Как следует из приведенных материалов, целесообразно применение многокритериальных проверок качества получаемых моделей, при этом желательна независимость критериев.

4.4 ОЦЕНИВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЕННОГО ОБЪЕКТА В ЦЕЛОМ

Оценивание состояния пространственно-распределенного СЛО в целом имеет особенности, состоящие в том, что построение аппроксимирующей модели проводится отдельно для каждого из составных элементов объекта. Тогда рассмотренный выше подход (п.4.1) справедлив и для элементов, при рассмотрении их как объектов с сосредоточенными параметрами.

В условиях нечеткости исходной информации применение ординальных порядковых шкал не может быть реализовано в полной мере [101,102,127-129]. Для этого используется шкала интервалов, в которой будет задано K «классов» с нечеткими границами, каждый из которых описывает состояние составного элемента, условно считаемого однородным, как части объекта с распределенными параметрами [27,102].

В этом случае реализуется следующее правило классификации: состояние составной части СЛО l_j есть такое состояние $Y(l_j)$, для которого

$$Y(l_j) \in Y_K, \quad (4.26)$$

где Y_K – K -тый класс шкалы.

Классы могут быть разделены на два подмножества:

G_i – составной элемент объекта устойчив;

G_l – составной элемент объекта неустойчив.

При выполнении (4.26) автоматически решается задача определения состояния объекта в целом. Такой подход позволяет анализировать также изменение состояния СЛО во времени.

Пусть для последовательных моментов времени t_k , $k = 1, 2, \dots$ получены значения состояния составных частей СЛО $Y(l_k, t_k)$. Применяя для каждого наблюдаемого состояния $Y(l_k, t_k)$ в момент времени t_k правило (4.26), легко оценить тенденцию развития состояния любого участка пространственно-распределенного объекта.

Из изложенного следует, что представленный подход [101] позволяет решать как задачи оценивания состояния СЛО в любой момент времени (мониторинг), так

и так и задачи оценивания тенденции развития состояния объекта во времени (задачи прогнозирования).

Помимо констатации факта существования тенденции в изменении состояния пространственно распределенного СЛО при наличии значений $Y(l_k, t_k)$ возможна и аппроксимация его состояния в целом некоторой аналитической функцией, например с использованием метода наименьших квадратов [27,220,221,224,226-229,317].

В ходе эксплуатации возникают ситуации, когда происходит изменение структуры объекта, проявляются различия трендов значений состояния СЛО в его отдельных элементах в силу объективных причин, например, старение или частичное разрушение элементов конструкции [101,102]. С точки зрения прогнозирования это может привести к изменению коэффициентов математической модели состояния СЛО или ее определенного элемента. В этом случае целесообразно применять, например, методы экспоненциального сглаживания, а затем уже проводить аппроксимацию трендов приемлемой аналитической функцией, описывающей тренд всего объекта в целом во времени. В зависимости от значения t_k при формировании оценки состояния вкладу каждой из переменных в (4.26) будет придаваться различный вес.

В процедуре экспоненциального сглаживания обычно используют полиномы не выше второй степени, коэффициенты которых имеют вид [27,102]:

$$\hat{a}_{0t} = 3S_t^{(1)} - 3S_t^{(2)} + S_t^{(3)}, \quad (4.27)$$

$$\hat{a}_{1t} = \frac{\alpha}{2\beta^2} [(6 - 5\alpha)S_t^{(1)} - 2(5 - 4\alpha)S_t^{(2)} + (4 - 3\alpha)S_t^{(3)}],$$

$$\hat{a}_{2t} = \frac{\alpha^2}{\beta^2} (S_t^{(1)} - 2S_t^{(2)} + S_t^{(3)}),$$

причем

$$\alpha = \frac{2}{N+1}, \quad \beta = \frac{N-1}{N+1},$$

где N – число учитываемых значений измерений;

$S_t^{(\circ)}$ – экспоненциальные средние, оценки обобщенного параметра в (4.27), полученная при применении экспоненциального сглаживания.

Значение точечного прогноза обобщенного параметра состояния СЛО на интервале Δt получают по формуле:

$$Y_{t+\Delta t} = \hat{a}_{0t} + \hat{a}_{1t}\Delta t + \frac{1}{2}\hat{a}_{2t}\Delta t^2. \quad (4.28)$$

Изложенный выше подход позволяет детально оценивать состояние пространственно-распределенного СЛО в целом и более точно планировать мероприятия по повышению его технической устойчивости [27,101,102,224-226].

Подробно применение оценивания состояния пространственно-распределенного объекта в целом показано в главе 5 (п.5.4) на примере оценивания состояния дымовой трубы, в том числе и попутно возникающие методологические вопросы.

4.5 КРИТЕРИИ ОЦЕНИВАНИЯ СТЕПЕНИ АДЕКВАТНОСТИ И ПРЕДСТАВИТЕЛЬНОСТИ ПОСТРОЕННЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

4.5.1 Критерий несмещенности вычисленных оценок

Проведенный анализ показывает, что в качестве критерия несмещенности вычисленных оценок \bar{e} можно использовать следующее неравенство:

$$\bar{e} < 0,0156 \left(4 \sum_{i=1}^n |b_i| + 2 \sum_{i,j=1}^n |b_{ij}| + \sum_{i,j,k=1}^n |b_{ijk}| \right), \quad i \neq j \neq k. \quad (4.29)$$

Следует подчеркнуть, что в (4.29) входят только значимые коэффициенты полиномиальной модели.

С другой стороны, если принять значение $\bar{e} = 0,5d(A_y)$, где $d(A_y)$ – показатель нечеткости по (2.33) зависимой переменной Y , а максимальные по модулю отклонения всех переменных в кодированном виде как «1», то (4.29) окончательно после элементарных преобразований примет вид:

$$0,5d(A_y) < \sum_{i=1}^n |b_i|. \quad (4.30)$$

В (4.30) суммирование идет от $i = 1$, то есть коэффициент b_0 не участвует в оценивании, поскольку он характеризует только центрирование модели, а не варьирование переменных вокруг этого центра.

Неравенство (4.30) можно интерпретировать как меру «полезности» или «представительности» построенной полиномиальной модели, используемой для оценивания состояния СЛО в том смысле, что вычисления с использованием данной модели несут значимую (полезную) информацию об описываемом объекте. Другими словами, выполнение неравенства (4.30) свидетельствует, что вариация зависимой переменной Y при максимальных отклонениях X_i существенно выделяется на фоне ошибки своего определения (см. рис. 4.7).

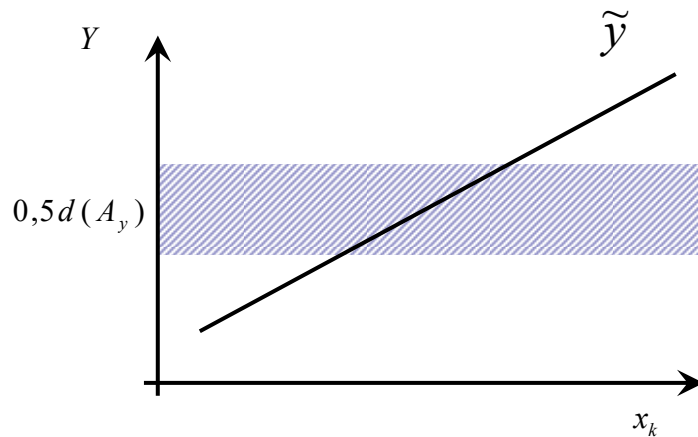


Рисунок 4.7 – К интерпретации критерия (4.28).

Выделена зона «неразличимости» результатов эксперта

Практическое применение (4.30) иллюстрируется далее в главах 5 и 6 для каждого из приводимых примеров.

4.5.2 Обоснование метода определения числа членов разложения аппроксимирующего полинома в условиях существенной неопределенности

Из вышеизложенного следует, что при реализации обобщенного алгоритма решения проблемы оценивания состояния СЛО (см. рис.4.2) коэффициенты аппроксимирующего полиномиального разложения находятся по формулам (4.7).

Общее число слагаемых полинома в каждом случае может быть найдено по формуле

$$Q = 1 + C_n^1 + C_n^2 + \dots + C_n^n. \quad (4.31)$$

Тогда согласно принятой методике (см. 4.2, пункт б) порядок полинома, описывающего модель состояния СЛО должен быть равен трем, а количество коэффициентов составляет $Q = 26$. Однако многие из них, как показывает практика, незначимо отличаются от нуля и поэтому необходимо разработать критерии отбрасывания таких коэффициентов.

При известных ошибках эксперимента в указанных ситуациях применяются общепринятые статистические критерии, например, t - критерий Стьюдента.

В случаях, когда факторное пространство содержит неколичественные (вербальные) переменные, вычисление значений которых затруднено или не представляется возможным в принципе, ошибка эксперимента численно задана быть не может. Поэтому целесообразно, на наш взгляд, использовать некоторые *тенденции*, присущие полиномам при возрастании количества слагаемых, а именно, тенденцию увеличения ошибки косвенных измерений Y , и тенденцию уменьшения остаточной среднеквадратичной ошибки (остаточной дисперсии) при таком же возрастании количества коэффициентов уравнения [224,230,235,236,239,265,266]. Применение этих тенденций базируется на независимости получаемых коэффициентов полинома (глава 3).

Продемонстрируем реализацию применения вышеприведенной концепции использования этих двух тенденций на примере построения полиномиальной модели как базы знаний для интеллектуальной информационно-диагностической системы. Согласно мнению экспертов полиномиальная модель строилась согласно предложенной ранее методике с учетом взаимодействия лингвистических переменных, описывающих состояния СЛО, только до третьего порядка в факторном пространстве из 5 переменных.

Если условно принять, что все параметры, измеряются, например, с одинаковой ошибкой 1,5 % (типичный класс точности измерительных приборов), то квадрат суммарной ошибки измерения по полиному $s_{изм}^2$, согласно закону

накопления ошибок, будет складываться из квадратов ошибок измерений линейных, парных и тройных взаимодействий. Первая часть численного эксперимента состояла в расчетах нескольких вариантов полинома с различным количеством его коэффициентов. Вторая часть состояла в вычислении остаточной дисперсии $s^2_{ост}$ при различном числе слагаемых полинома. Результаты расчётов представлены на рисунке 4.8.

Обобщение полученных результатов в виде графиков, представленных на рисунке 4.8 показывает разнонаправленность рассмотренных тенденций, так что точка их пересечения (примерно 8) указывает на компромиссное число коэффициентов полинома, удовлетворяющее некоторым образом обеим тенденциям.

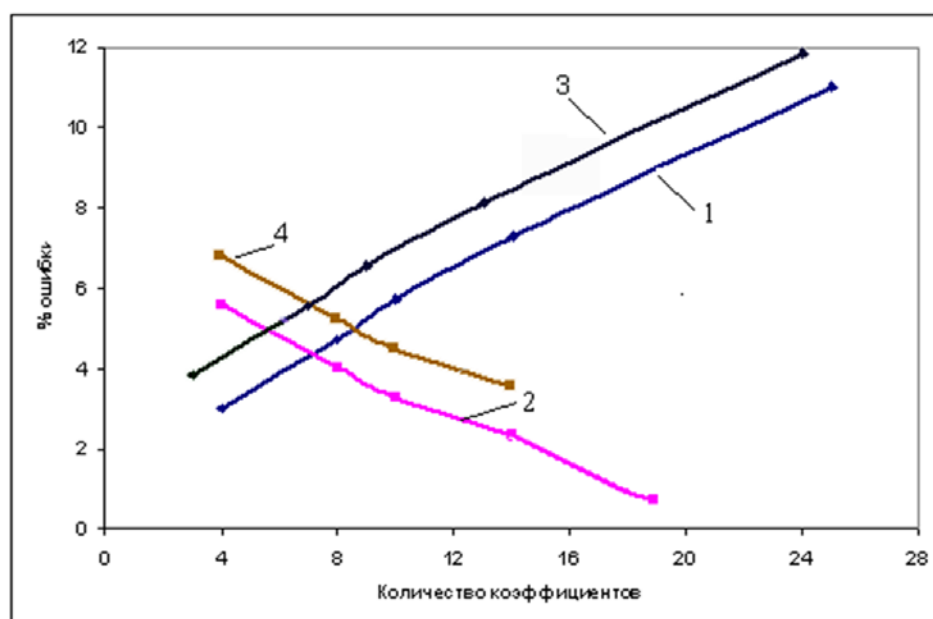


Рисунок 4.8 – Графики изменения ошибок вычислений по полиному от количества коэффициентов: 1, 3 – линии ошибок косвенных измерений; 2,4 – линии остаточных ошибок по уравнению; 1,2 – все переменные определены с ошибкой 1,5%; 3,4 – 3%

Обратим внимание еще раз на следующие рекомендации относительно определения наилучшей интерполяционной формулы: количество коэффициентов разложения полинома должно обеспечивать с одной стороны, необходимую

точность вычислений, а с другой – адекватность вычисленных значений мнению эксперта.

Поскольку в данном случае при выборе наилучшей интерполяционной формулы t -критерий Стьюдента для оценивания значимости коэффициентов полинома неприменим, то оценивание адекватности построенной модели приходится проводить ситуационно.

Отметим ещё одну особенность построения полиномиальной модели с использованием предлагаемого нечетко-возможностному подхода, которая предоставляет возможность нивелировать влияние ошибок определения коэффициентов при неколичественных переменных. Согласно методам теории планирования экспериментов при вычислении коэффициентов соответствующей полиномиальной модели используются только значения зависимой переменной, причем ошибка ее определения остается постоянной. При этом известно [55], что увеличение ошибок измерения независимых переменных до 10% при пассивном эксперименте существенно влияют на изменение величин коэффициентов модели, а ошибки определения зависимой переменной таким свойством не обладают.

Применение такой методики определения количества членов полиномиального разложения наилучшим образом представляет мнение эксперта. Однако для этого необходимо ещё, как следует из методики построения модели оценивания состояния СЛО (рисунок 4.5), проводить проверку гипотез об адекватности построенных моделей оценивания состояния СЛО. Этим вопросам будет уделено особое внимание в главах 5 и 6.

ВЫВОДЫ ПО 4 ГЛАВЕ

1. Разработана методика, реализующая концепцию и метод формализованного описания интуитивно-словесных и неявно заданных экспертных знаний о состоянии СЛО на основе дальнейшего развития нечетко-возможностного подхода и теории планирования экспериментов, включающая пошаговый алгоритм построения аналитических выражений и проведение проверки их адекватности с использованием предложенных в диссертации критериев.

2. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработана методика классификации состояний СЛО в многомерных пространствах нечетких переменных. Показано, что концепция определения классов состояния СЛО позволяет на конструктивном уровне учесть знания и опыт экспертов при решении широкого круга практических задач. Образованное при этом фактор-множество устанавливает взаимнооднозначное соответствие между выбранными классами и сформулированными экспертом косвенными признаками вербальных атрибутов, характеризующих компоненты вектора состояний СЛО, смысловое содержание которых, во-первых, соответствует реально протекающим изменениям (трансформациям) состояния СЛО, и, во-вторых, отражает степень потери объектом или его элементами своих эксплуатационных свойств в виде изменения значений входных переменных и, как следствие, зависимой переменной Y .

3. Разработаны методика и критерии оценивания адекватности и полезности предложенных моделей для оценивания состояния СЛО с использованием построенных полиномиальных моделей и с учетом нечетких данных об особенностях функционирования СЛО и заданных условий эксплуатации. Введенные критерии, в отличие от известных, предоставляют возможность априорного оценивания несмещенности и эффективности получаемых с помощью полиномиальных моделей оценок состояния СЛО. При этом было установлено, наиболее предпочтительно применение разработанных методики и критериев в тех ситуациях, когда факторное пространство состоит исключительно из неколичественных или неизмеримых переменных. На основе предложенного комбинированного метода (главы 2 и 3) разработаны методика и алгоритмическое обеспечение формализации экспертной информации при аналитическом описании состояния СЛО на основе явных и неявных экспертных знаний, реализующие концепцию построения моделей в нечеткой среде путем синтеза элементов теории нечетких множеств и теории планирования экспериментов.

4. Предложенная методика предполагает реализацию следующих основных этапов:

- оценивание состояния пространственно-распределенного объекта в целом на базе его однотипных отдельных элементов с последующей аппроксимацией поведения всего объекта некоторой функцией;

- использование последовательности правил для оценивания степени адекватности полученных полиномиальных выражений, с помощью которых проводится оценивание состояния СЛО;

- использование правил и критериев проверки рациональности и полезности разработанных математических моделей для оценивания состояния СЛО;

- ситуационный выбор количества коэффициентов полиномиальной модели для случаев, когда факторное пространство содержит (не содержит) исключительно неколичественные или неизмеримые лингвистические переменные, либо, когда имеется комбинация количественных и неколичественных лингвистических переменных.

ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ ПОСТРОЕНИИ МОДЕЛЕЙ ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ В СТАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Принятие решений всегда является ответственным шагом, завершающим творческий этап переработки многофакторной информации. Поэтому стратегическим направлением автоматизации процессов принятия решения о состоянии СЛО практически во всех областях науки и техники можно считать разработку методов, способных синтезировать модели и алгоритмы оценивания и прогнозирования поведения изучаемых систем для облегчения работы лица, принимающего решение.

Эффективность предложенной в диссертации методологии формализации экспертной информации в многомерном слабоструктурированном пространстве нечетких переменных в виде полиномиальных моделей оценивания состояния СЛО и прогнозирования поведения трудноформализуемых процессов к настоящему времени практически подтверждена (главы 2-4) в различных областях знаний: теории нечетких множеств [76-79,218,228,234,236, 239,240, 242-244,247,248,250,251,253,255,259], космонавтике [29,30,66,117-119,204,205,238, 246], металлургии цветных металлов [76,79,105,161,201,214,223,241,249, 252,254,256], автоматизация и управление [160,161,189,190,192,198-200,213,214, 216,217,230,231,237,289], строительном деле [99,101,129,215,222,229,232,300, 317], экономике [233,235], газовой промышленности [264,265,266], геокриологии и геотехнике [128,258,263,297-299,301-303], управлении риском и безопасностью сооружений [27,101,102,127,219-221,224,225-228,], психологии [234,245,248,257], ветеринарии и сельском хозяйстве [49-51,120,175,176,]

Универсальность разработанного в главах 2-4 научно-методического аппарата синтеза математических моделей оценивания состояния СЛО на основе экспертных знаний в данной главе демонстрируется на примерах из различных областей науки и техники.

В ходе выполнения диссертационного исследования нашли свое применение все разработанные методологические и методические основы синтеза моделей для оценивания и прогнозирования состояния СЛО с использованием явных и неявных экспертных знаний. При этом были решены все ранее сформулированные в рамках классов А, Б, В и Г теоретические и прикладные задачи (см. главу 1).

На рисунке 5.1 показаны разработанные в диссертации методические и методологические основы синтеза моделей оценивания и прогнозирования состояния СЛО с использованием экспертных знаний, включающие постановку и одновременно решение задач всех перечисленных выше четырех классов.

Вышеизложенные разработанные в диссертации теоретические основы включают в себя: общие методические основы и множество частных методик практического извлечения, представления (*первое – четвертое направления*, рисунок 1.10), формализации явных и неявных экспертных знаний (*пятое направление*), а также критерии оценивания качества (адекватности) построенных моделей (*шестое направление*).

Ниже представлены результаты практической реализации однопараметрического оценивания состояния нескольких СЛО в статических условиях.

Также в данной главе приведены примеры, иллюстрирующие интеллектуальную поддержку принятия решений о состоянии различных СЛО на основе построенных моделей. Для сокращения объема представляемого материала примеры описаны фрагментарно с выделением существенных деталей для иллюстрации разработанных в предыдущих главах методов и методик.

В последующих разделах настоящей главы более подробно рассмотрены вопросы, решение которых позволяет в потенциале разрабатывать новые методы и средства обработки информации для выработки и принятия решений, например, по повышению эффективности управления СЛО.

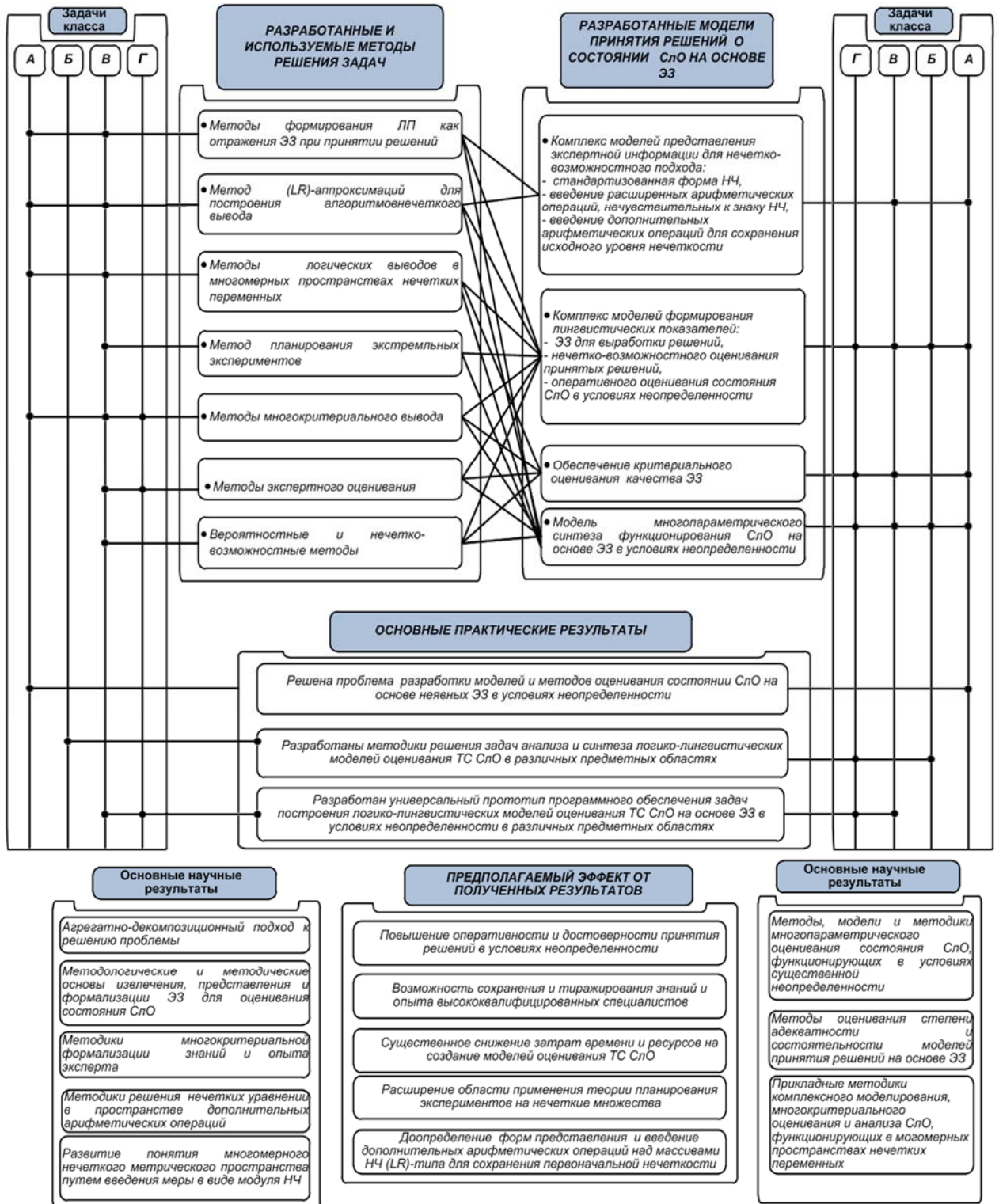


Рисунок 5.1 – Методические и методологические основы решения проблемы синтеза полиномиальных моделей оценивания состояния СЛО на основе явных и неявных экспертных знаний

5.1 ОЦЕНИВАНИЕ СТЕПЕНИ РАЗВИТИЯ ДЕФЕКТОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ ЗАПРАВОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Целью данного исследования является разработка на основе экспертных знаний экспресс-методики количественного оценивания степени развития дефектов в любой момент времени при эксплуатации насосных агрегатов (НА) заправочного оборудования ракетно-космических комплексов (ЗО РКК) [29,30].

5.1.1 Краткая характеристика объекта исследования

Важнейшей составной частью наземного технологического оборудования (ТО) стартовых комплексов (СК) является заправочное оборудование (ЗО). В состав ЗО входят: хранилища компонентов ракетных топлив (КРТ), система подачи с оборудованием обвязки, трубопроводы, запорно-регулирующая арматура, а также система дистанционного управления заправкой (СДУЗ).

В системе подачи КРТ головным объектом выступают гидравлические насосные агрегаты (НА), как показано на рисунке 5.2. Следует отметить, что на космодромах РФ большая часть ЗО СК, в том числе и НА, работает за пределами назначенных показателей ресурса. Существующие методы контроля состояния НА, в связи со спецификой их эксплуатации на космодромах, например, всего несколько пусков в год с непредсказуемым временем простоев между пусками (рисунок 5.3), не предусматривают полномасштабный непрерывный мониторинг основных эксплуатационных параметров, а регламентируют регистрацию их значений только в момент непосредственного проведения экспресс-оценки состояния перед предполагаемым пуском ракеты космического назначения (РКН).

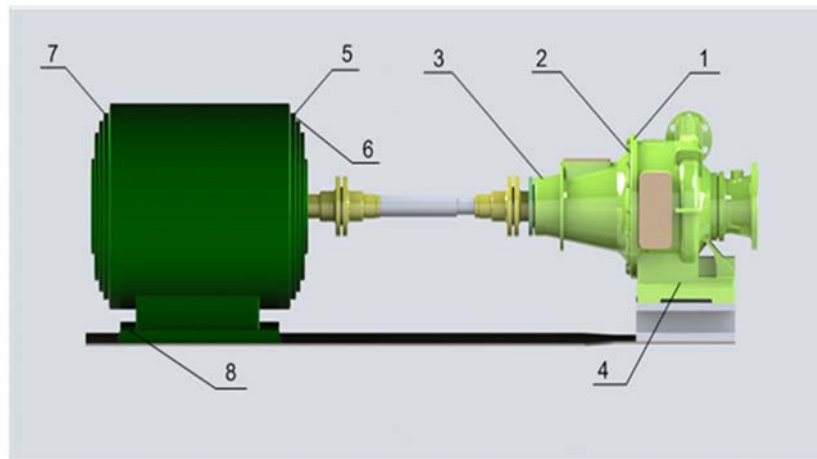


Рисунок 5.2 – Расположение точек контроля на насосном агрегате:
 1 – опорный узел роликового подшипника; 2 – опорный узел роликового подшипника (измерение в горизонтальной плоскости); 3 – опорный узел шарикового подшипника; 4 – крепление к фундаменту; 5 – опорный узел №1 электродвигателя; 6 – опорный узел №1 электродвигателя (измерение в горизонтальной плоскости); 7 – опорный узел №2 электродвигателя ;
 8 – крепление электродвигателя к фундаменту

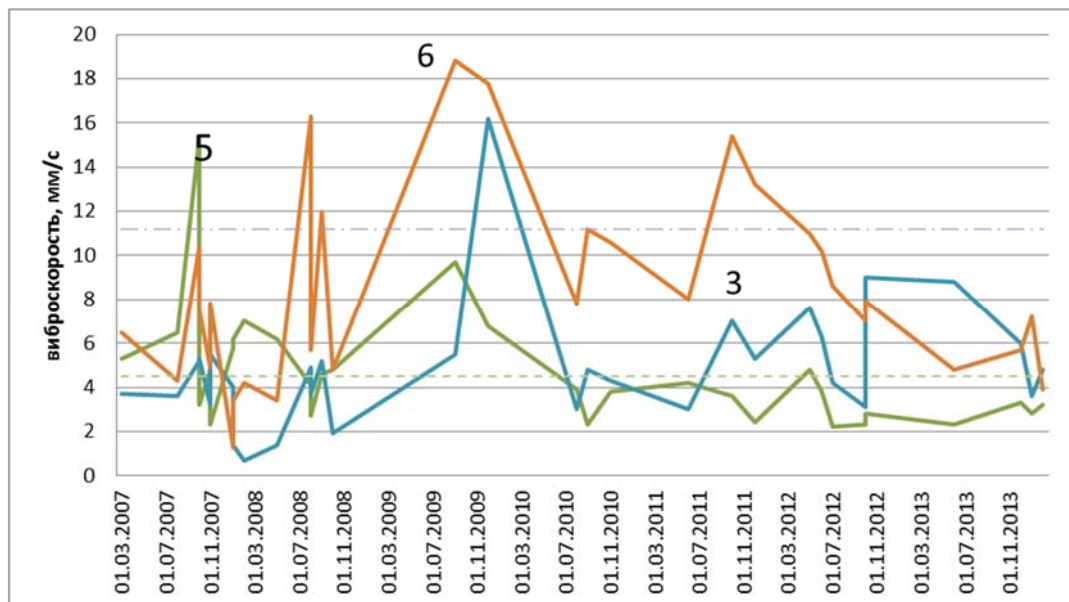


Рисунок 5.3 - Временная диаграмма проведения экспресс-оценок состояния насосного оборудования (цифры у кривых соответствуют номерам точек измерения на рисунке 5.2)

В соответствии с ГОСТ ИСО 10816-1-97 и утвержденными методиками при продлении назначенных показателей ресурса и подготовке к пуску РКН специалисты контролируют температуру и параметры вибрации НА 30 СК: виброускорение, виброскорость, размах виброперемещения.

Методика обследования насосных агрегатов состоит в следующем [29,30]. Из числа потенциально возможных выбирают точки контроля, которые в максимальной степени реагируют на динамические силы и характеризуют общее вибрационное состояние машины, как показано на рисунке 5.2.

Измерения проводят виброметром ВК-5, что позволяет в реальном масштабе времени проводить экспресс-оценку состояния агрегата в контролируемых точках. Типичные результаты контроля насосного агрегата представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Результаты контроля параметров вибрации агрегата заправки ракетносителя*)

Тип и обозначение НА	Наименование контролируемого параметра	Номера точек							
		1	2	3	4	5	6	7	8
ЦН-112М «А»	Виброскорость, мм/с	10,4	11,1	10,2	6,3	3,3	8,7	4,5	4,4
	Виброперемещение, мкм	24	50	41	32	27	76	26	22
ЦН-112М «Б»	Виброскорость, мм/с	8,3	4,5	9,7	8,9	5,5	18,8	6,2	7,4
	Виброперемещение, мкм	68	48	10	32	52	163	49	67
ЦН-112М «В»	Виброскорость, мм/с	2,6	4,4	4,3	6,4	5,9	13,7	4,9	3,3
	Виброперемещение, мкм	17	20	17	12	57	130	46	26
ЦН-112М «Г»	Виброскорость, V, мм/с	6,0	9,1	13,4	7,3	2,4	11,7	4,4	2,4
	Виброперемещение, мкм	21	52	29	29	19	109	41	22

*) Жирным шрифтом выделены предельные по ГОСТ значения

Согласно существующей классификации по допустимым вибрациям электронасосные агрегаты ЦН-112М относятся к классу средних машин (до 300 кВт), жестко установленных на специальных фундаментах. Машины подобного класса считаются пригодными для дальнейшей эксплуатации без ограничения сроков при значениях виброскорости до 4,5 мм/с и при значениях виброскорости от 4,5 мм/с до 11,2 мм/с рассматриваются как непригодные для длительной непрерывной эксплуатации и могут функционировать ограниченный период времени, а при значениях свыше 11,2 мм/с – вибрации рассматриваются как достаточно серьезные, для того чтобы вызвать повреждение машины [29].

По такой регламентированной соответствующими инструкциями шкале на основании полученных результатов контроля делается вывод о состоянии агрегата в данный момент времени. Так, по данным измерений, приведенных в таблице 1, можно сделать однозначный вывод, что три агрегата под литерами «Б», «В» и «Г» к эксплуатации в данный момент не пригодны и нуждаются в техническом ремонте.

Следует отметить, что существующие методики рассматривают и оценивают каждый из факторов отдельно, хотя естественно полагать, что в процессе эксплуатации составные узлы насосного оборудования обуславливают их взаимовлияние и регистрируемые параметры являются, по своей сути, обобщенными характеристиками состояния насосного агрегата в целом.

5.1.2 Выбор и обоснование факторного пространства принятия решения о фактическом состоянии агрегата

В данном исследовании насосный агрегат рассматривается как единый целостный объект, что обуславливает возможность комплексного использования как количественных, так и не количественных переменных. Такой подход позволяет строить модель оценивания состояния насосного агрегата с использованием знаний и опыта высококвалифицированных специалистов-экспертов, эксплуатирующих данный объект [29,30].

Эксплуатация насосных агрегатов стартового комплекса имеет ряд специфических особенностей по сравнению с требованиями и методиками по

ГОСТ ИСО 10816-1-97. Так, например периодичность функционирования оборудования (рисунок 5.3) составляет 1-4 цикла в год при кратковременности одного цикла 1-4 часа; существенными являются факторы, связанные с использованием агрессивных компонентов ракетного топлива; регламентированное проведение технических осмотров только непосредственно перед стартом ракет космического назначения; уровень квалификации обслуживающего персонала; неопределенность степени влияния наведенной вибрации и др.

Проявлениями такой неопределенности являются отказы насосных агрегатов по некоторым видам дефектов, о чем свидетельствуют данные из многолетней практики их функционирования, представленные в виде круговой гистограммы на рисунке 5.4.

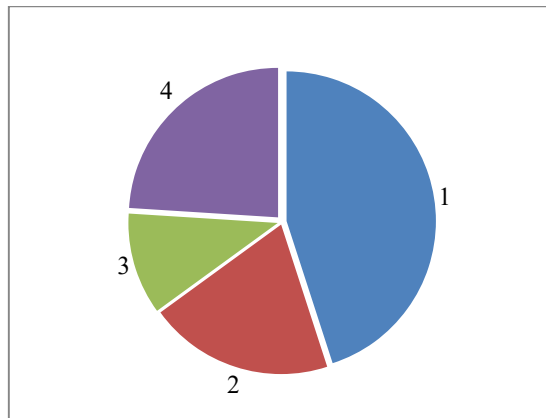


Рисунок 5.4 – Гистограмма распределения отказов в насосных агрегатах ЗО СК по видам дефектов: 1 – разрушение подшипника; 2 – разрушение ступицы; 3 – разрушение торцевого уплотнения; 4 – перекас вала

Таким образом, задача исследования состоит в следующем.

Исходное состояние: величина виброскорости перед пуском ракет космического назначения рассматривается как индикатор работоспособности НА ЗО РКК.

Требуется: построить модель оценивания величины измеренной виброскорости как обобщенного показателя действия дефектов, возникающих в процессе эксплуатации.

Из числа потенциально возможных были выбраны (*задача класса А*) следующие количественные и нечисленные (вербальные) переменные:

X_1 – несоосность валов, (мкм);

X_2 – перекос колец, (градусы);

X_3 – показатель отсутствия ресурсной смазки (нечисленная переменная);

X_4 – влияние наведенной вибрации (нечисленная переменная);

X_5 – агрессивная среда в торцевом уплотнении (нечисленная переменная);

X_6 – время простоя между циклами, (мес.);

X_7 – температура опорных узлов, (°С).

В качестве выходной переменной была выбрана Y – скорость вибрации, (мм/с) – как интегральное состояние насосного агрегата в целом (рисунок 5.5), по которому принимается соответствующее решение. решение о состоянии оборудования (таблица 5.2).

В таблице 5.2 (*задача класса Б*) представлены характеристики, а на рисунке 5.5 – графический вид лингвистической переменной Y . График на рисунке 5.5 содержит шкалы: три по оси абсцисс – лингвистическую («Низкая», ..., «Высокая»), перевода лингвистической в числовую (5, ..., 13) и кодированных значений переменной (-1, ..., +1) для опросной матрицы (таблица 5.2), а по оси ординат – шкалу функции принадлежности в интервале [0,1].



Рисунок 5.5 – Скорость вибрации (мм/с) как как интегральное состояние насосного агрегата заправочного оборудования стартового комплекса

Таблица 5.2 – Характеристика Y как лингвистической переменной

Интервалы	Мода	Значение моды	Характеристика
7 и ниже	Низкая	3	Профилактика не требуется
3 – 11	Ниже средней	7	Периодический контроль
7 – 15	Средняя	11	Постоянный контроль. При выходе за предельный уровень – вывод в ремонт
11 – 19	Выше средней	15	Постоянный контроль. Возможна эксплуатация только на нижней границе интервала
15 и выше	Высокая	19	Эксплуатация недопустима

5.1.3 Построение и анализ модели состояния насосного агрегата

Согласно ранее предложенной методике, экспертом заполняется опросная матрица специального вида (таблица 5.3) по технологии теории планирования экспериментов типа 2^{7-1} , по которой далее строится полиномиальная модель (*задача класса В*).

В таблице 5.3 приведен фрагмент опросной матрицы с ответами эксперта в лингвистическом и оцифрованном видах, а также рассчитанные значения Y по аналитическому выражению.

Значения по каждой из независимых переменных представлены в стандартизованном масштабе оппозиционной шкалы $[-1, +1]$ путем кодирования по формулам (3.35) и (3.36) для последующего получения безразмерных коэффициентов полиномиальной модели.

Таблица 5.3 – Фрагмент опросной матрицы с ответами эксперта и расчетными значениями по модели

№ П/ П	Степень несоосности валов, МКМ	Перекося колец, угол	Степень отсутствия смазки	Степень наведенной вибрации	Возможность попадания агрессивной среды	Время простоя между циклами	Температура опорных узлов	Обобщенный показатель состояния НА		
								Экспертные моды термов	Числовые значения термов	Расчетные значения по (1)
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	Y_9	Y_9	$Y_{расч}$
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	Н	3	3,1875
2	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	НС	7	6,8125
3	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	Н-НС	5	5,0625
4	1	1	-1	-1	-1	-1	1	С	9	10,937
...
...
61	-1	-1	1	1	1	1	1	BC	15	14,875
62	1	-1	1	1	1	1	-1	BC-B	17	16,375
63	-1	1	1	1	1	1	-1	C-BC	13	12,625
64	1	1	1	1	1	1	1	B	19	18,281

По результатам обработки экспертных данных, приведенных в таблице 5.3, получено аналитическое выражение:

$$\begin{aligned}
 Y = & 11,25 + 2,3125x_1 + 1,0625x_2 + 1,0x_3 + 1,0x_4 + 1,625x_5 + 0,8125x_6 \\
 & + 0,5625x_7 - 0,4375x_1x_3 - 0,875x_1x_7 - 0,5x_2x_6 - 0,375x_2x_7 \\
 & - 0,3125x_5x_6 - 0,375x_1x_5x_7 + 0,4375x_2x_4x_5 .
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

Степень адекватности (5.1) оценена (*задачи класса Г*) по критериям представительности (глава 4). Так, точность вычислений по (5.1), определяемая по значению остаточного среднеквадратического отклонения $s_{ост}$ (см. 4.2) по всему множеству точек таблицы 5.3, ниже исходной нечеткости (2.33) экспертных оценок $0,5 d(A_y)$

$$s_{\text{ост}} = 0,752 < 2 = 0,5 d(A_y) ,$$

а по критерию (4.28) сумма модулей коэффициентов полинома (5.1) существенно выше $0,5 d(A_y)$

$$12,98 = \sum_{i=1}^n |b_i| \gg 0,5d(A_y) = 2.$$

Оба эти критерия указывают на адекватность модели (5.1) экспертным знаниям и опыту при эксплуатации насосного агрегата.

Дополнительно на рисунке 5.6 показан график корреляции оценок эксперта и расчетных по полиному (5.1), из анализа которого следует отсутствие тенденций отклонения рассеяния точек от теоретической линии регрессии – диагонали квадрата.

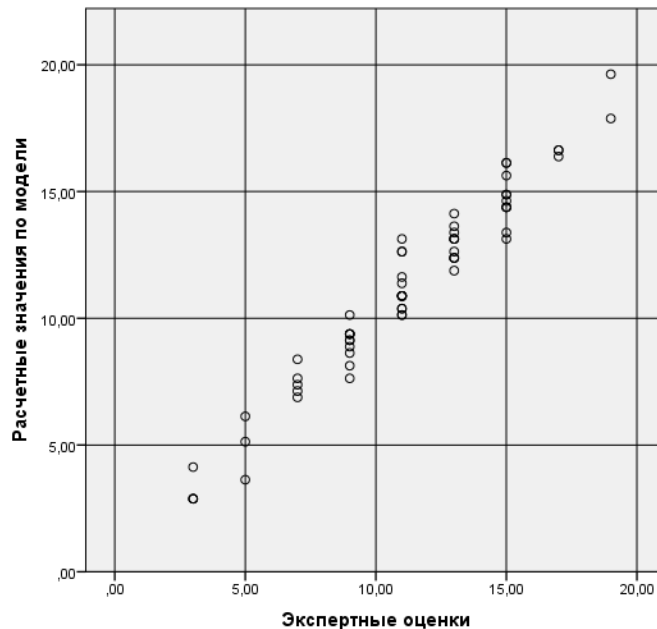


Рисунок 5.6 – Корреляция оценок эксперта (ось абсцисс) и расчетных по полиному (5.1)

Вычисленные по (5.1) значения в условиях проведения обследования таблицы 5.1 для точки 6 (рисунок 5.2) дают ошибку менее 5% отн. Так, рассчитанная виброскорость составила: для агрегата А 9,11; Б – 19,06; В – 14,16; Г – 12,23 мм/с.

Из проведенного оценивания следует вывод о том, что полином (5.1) адекватно описывает изучаемое явление и его можно использовать как модель состояния насосного агрегата [224].

На основе полученной модели (5.1) был проведен численный эксперимент (*задача класса Г*): значения всех переменных фиксировались на определенном уровне состояния агрегата кроме одной, которая затем «пробегала» всю шкалу признака от «-1» до «+1», как показано на рисунке 5.7.

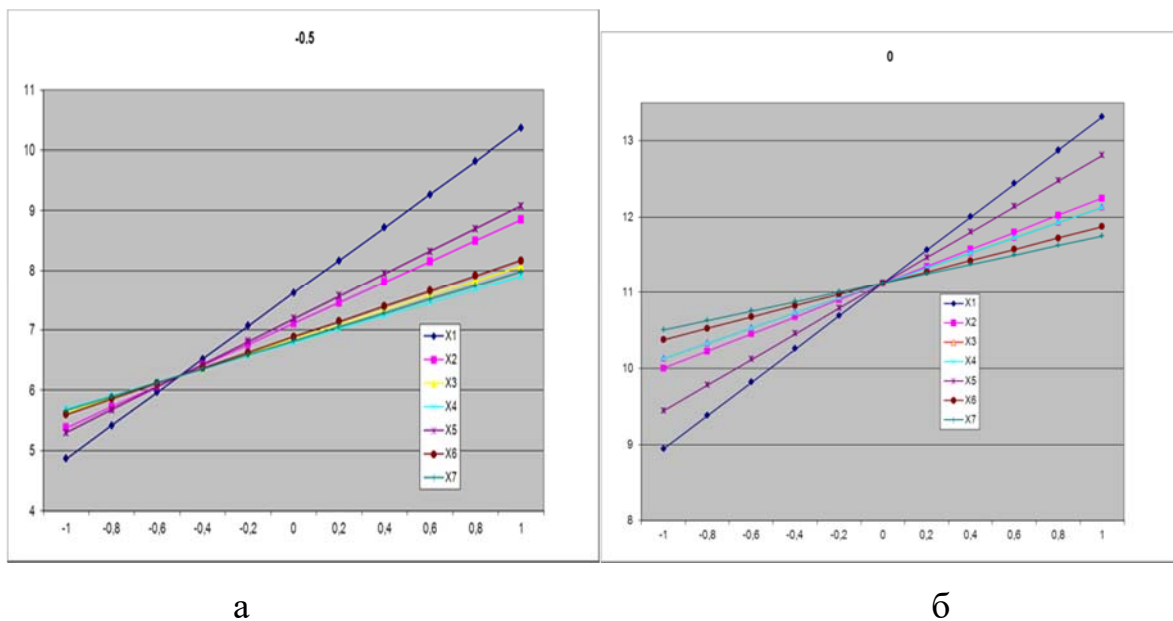


Рисунок 5.7 – Результаты численного эксперимента: а – при начальных; б – срединных значениях эксплуатации

По поведению графиков можно судить о силе влияния соответствующего фактора на зависимую переменную с учетом влияния остальных. Так, по графику на рис. ба можно сделать следующие заключения: если значения всех переменных находятся только на начальных уровнях (например, после ремонта), то наблюдаемая картина полностью соответствует сложившемуся мнению эксплуатационщиков: наибольшее влияние на выходную переменную (скорость вибрации) оказывают несоосность валов и затем перекося колец, отсутствие ресурсной смазки, а попадание агрессивной среды в торцевое уплотнение и температура опорных узлов примерно равносильны. Однако даже максимально

допустимые значения переменных по одиночке не дают превышения вибрации выше регламентируемой 11,2 мм/с.

Совершенно другая ситуация складывается, если все значения переменных одновременно достигают среднего уровня (рисунок 5.7б): превышение хотя бы одного из них приводит к превышению предельного значения вибрационной скорости 11,2 мм/с. Обращает на себя внимание усиление влияния переменных, характеризующих попадание агрессивной среды в торцевое уплотнение и степени наведенной вибрации. При этом можно отметить, что повышенное внимание эксперта на попадание агрессивной среды в торцевое уплотнение указывает скорее на необходимость более тщательного отношения к технике безопасности при работе с высокотоксичными агрессивными средами.

Модель (5.1) дает возможность проведения более глубокого анализа изучаемого явления (*задача класса Г*), как показано ниже. Так, взятие частных производных позволяет вычислить градиент функции (5.1) в различных состояниях насосного агрегата:

$$\frac{\partial Y}{\partial x_1} = 2,3125 - 0,4375x_3 - 0,875x_7 - 0,375x_5x_7;$$

$$\frac{\partial Y}{\partial x_2} = 1,0625 - 0,5x_6 - 0,375x_7 + 0,4375x_4x_5;$$

$$\frac{\partial Y}{\partial x_3} = 1,0 - 0,4375x_1;$$

$$\frac{\partial Y}{\partial x_4} = 1,0 + 0,4375x_2x_5;$$

$$\frac{\partial Y}{\partial x_5} = 1,525 - 0,3125x_6 - 0,375x_1x_7 + 0,4375x_2x_4;$$

$$\frac{\partial Y}{\partial x_6} = 0,8125 - 0,3125x_5;$$

$$\frac{\partial Y}{\partial x_7} = 0,5625 - 0,875x_1 - 0,375x_2 - 0,375x_1x_5.$$

Градиент функции вычисляют по формуле

$$\text{grad } Y = \sqrt{\sum_{i=1}^7 \left(\frac{\partial Y}{\partial x_i}\right)^2} \quad (5.2)$$

и рассчитывают его значения.

Рассмотрим случаи благоприятного и неблагоприятного состояния насосного агрегата. Так, в благоприятном случае в начале эксплуатации после очередного технического обслуживания и проведения соответствующего ремонта все переменные принимают значения $x_1, \dots, x_7 = -1$, а величина градиента составит $grad Y = 4,57$.

При неблагоприятном случае значения всех переменных принимают значения $x_1, \dots, x_7 = 1$, а величина градиента составит $grad Y = 2,67$.

Следует особо отметить еще одно важное обстоятельство, касающееся специфики эксплуатации насосного агрегата заправочного оборудования стартового комплекса и состоящее в том, что специальные комплексные исследования мониторинга агрегатов или их узлов с применением различных методов диагностирования практически не проводилось. Поэтому нерешенными остались следующие насущные вопросы: виды вибрационных измерений, используемых для измерения; основные подходы к выбору диагностических признаков; правила построения эталонов и определения пороговых значений; подходы к диагностике и прогнозу состояния насосного агрегата в целом и др. Видимо, уверенность в заложенной избыточной прочности при создании насосных агрегатов для космической отрасли и инерционность мышления ответственных руководителей («до сих пор же ракеты запускают») ограничивает применения всего спектра существующих методик для решения назревших задач по повышению безопасности эксплуатации насосных агрегатов стартовых комплексов. Теми же причинами можно объяснить строгое соблюдение всех пунктов ГОСТ ИСО 10816-1-97, не учитывающего всю специфику эксплуатации насосных агрегатов стартовых комплексов.

5.1.4 Методика прогнозирования степени развития дефектов при эксплуатации насосных агрегатов

Методика использует модель (5.1) в качестве базы знаний для принятия решения о степени развития дефектов при эксплуатации насосных агрегатов

стартовых комплексов (*задача класса Г*). При этом фактически решается обратная задача: по величине виброскорости определить степень развития дефектов.

Методика состоит в следующем. Измеренную виброскорость декомпозируют на составляющие в выбранном экспертом факторном пространстве модели виброскорости (5.1), строят графики изменения Y на постоянных уровнях состояния системы для каждой из переменных во всем диапазоне изменения независимых переменных в кодированном виде при остальных, закрепленных на этих уровнях. Затем на оси ординат в точке измеренного значения виброскорости проводят горизонтальную линию и по точкам пересечения с графиками определяют степени развития соответствующими дефектов на оси абсцисс в кодированном масштабе с последующим декодированием их величин в натуральный масштаб.

На рисунке 5.8 представлены графики изменения зависимости виброскорости (ось ординат) от каждой из переменных факторного пространства в кодированном виде (ось абсцисс) при всех остальных, закрепленных на их средних уровнях.

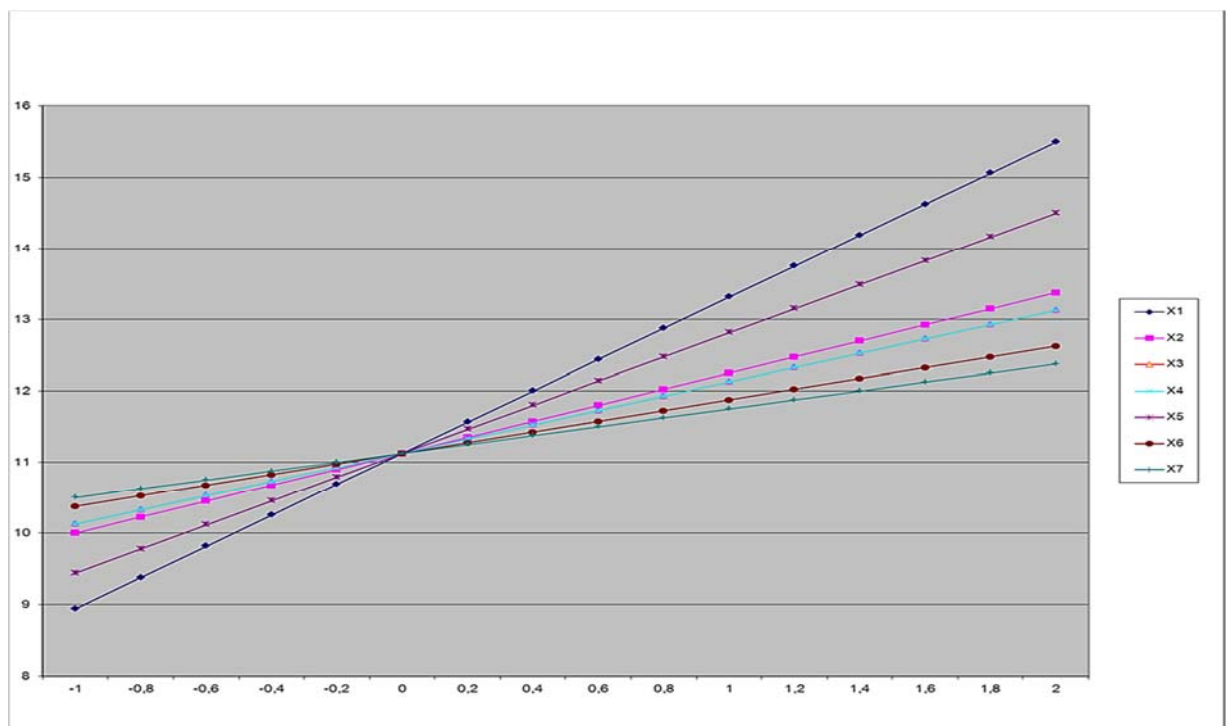


Рисунок 5.8 – Зависимость виброскорости (ось ординат) от каждой из переменных факторного пространства в кодированном виде

Кроме того, на основе рисунка 5.8 можно провести ранжирование переменных по силе их влияния на величину виброскорости.

В заключение данного параграфа можно сделать следующие выводы:

- модель количественного оценивания состояния насосных агрегатов заправочного оборудования стартовых комплексов РКК в многомерном пространстве нечетких переменных позволяет получать не только оценки состояния указанных агрегатов, но и принципиально новую обобщенную информацию о поведении агрегата в процессе его эксплуатации;

- при проведении ремонта следует учитывать, что x_1 – степень несоосности валов – может достигать значения 0,46 мм при максимально допустимом 0,2 мм.

Построенная модель, как следует из рассмотренного примера, способна стать базой знаний для более глубокого изучения процессов, происходящих внутри насосных агрегатов и в целом в заправочном оборудовании, при условии использования расширенной номенклатуры применяемых методов вибрационной диагностики.

Разработанный «Способ количественного оценивания степени развития дефектов при эксплуатации насосных агрегатов заправочного оборудования ракетно-космических комплексов» защищен патентом РФ № 2673629 от 28 ноября 2018 г.

5.2 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ И ОБОРУДОВАНИЯ СТАРТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОГО ТЕПЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ

5.2.1 Постановка задачи прогнозирования

Опыт эксплуатации стартовых комплексов показывает, что ряд элементов конструкции и газоотводящих трактов, непосредственно взаимодействующих со струями продуктов сгорания ракетных двигателей, подвергаются интенсивному тепловому, пульсационному нагружениям и последующему воздействию окружающей среды [238]. Так, в донной части газохода мощное сверхзвуковое течение потока высокотемпературных отходящих газов при поворотах на клиньях и выкружках приводит к появлению стационарных скачков уплотнения, за

которыми скорость потока падает и повышаются его давление и температура. На этом фоне проявляются все негативные процессы нестационарной теплопроводности в глубине металлической облицовки газохода. Цикл теплового нагружения завершает процесс остывания, при котором температурные напряжения могут менять свой знак. Накопление микроизменений в толще металла приводит к макроизменениям всей металлоконструкции. Это приводит к накоплению повреждений, трещинообразованию и расходованию ресурса элементов конструкции и оборудования (рисунок 5.9). Ремонтно-восстановительные работы или капитальный ремонт с полной заменой металлоконструкций газоотводящих трактов требует больших финансовых затрат [110,141].

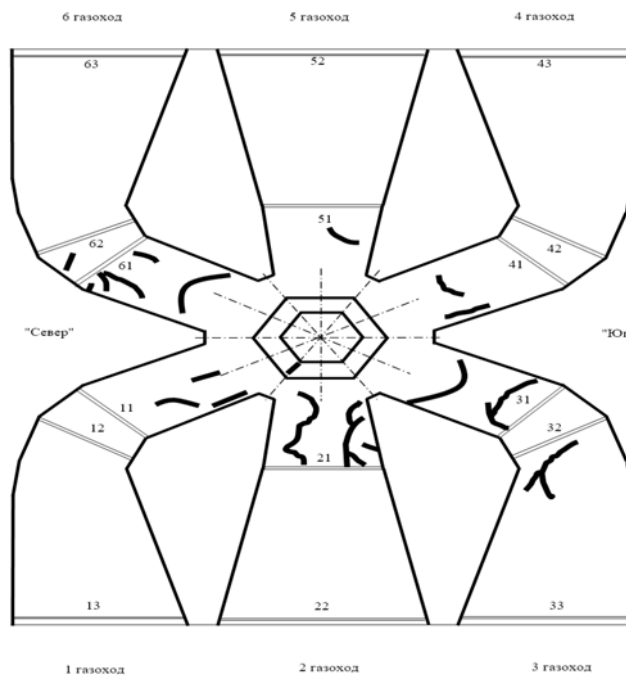


Рисунок 5.9 – Типичная схема распределения трещин в газоотводе после пуска ракеты космического назначения

Строгая постановка задачи оценивания состояния газохода требует привлечения сложных математических моделей из различных областей знаний: газодинамики, теплофизики и термодинамики, механики деформируемых сред, материаловедения и др., что делает их трудноформализуемыми. Принимаемые же упрощения при постановке задач подобного рода переводят их решение в разряд

задач, приближенно описывающих общие тенденции. В подобных условиях привлечение квалифицированных специалистов и формализация их знаний и опыта в виде полиномиальных моделей по разработанной технологии представляется вполне оправданной.

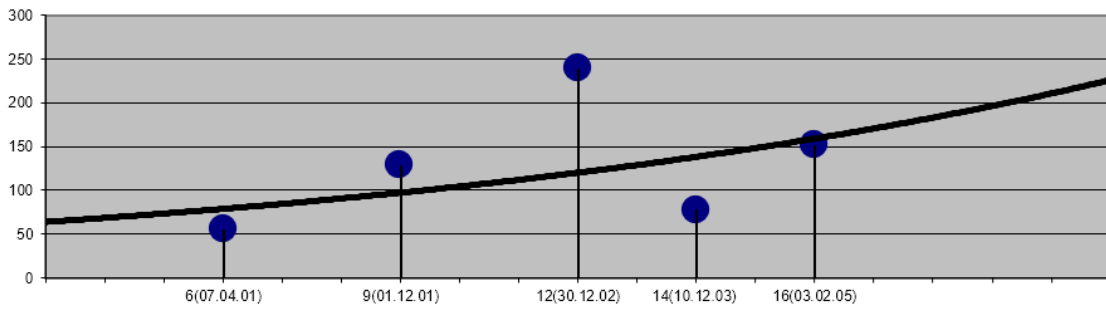
Обычно по измерению суммарной длины трещин после нескольких пусков накопленные статистические данные обрабатываются с использованием метода наименьших квадратов (МНК) и на основе уравнений регрессии осуществляется прогноз повреждений на несколько пусков вперед (рисунок 5.10).

Примеры такого сезонного прогноза изменения суммарной длины трещин в газоотводе МОГ 24 ПУ на 5 пусков вперед после 14 осуществленных пусков показан на рисунке 5.10 (Акт от 18 марта 2005 г. технического состояния металлоконструкций облицовки газоходов сооружения 1 ПУ №24 СК 8П882К войсковой части 93764).

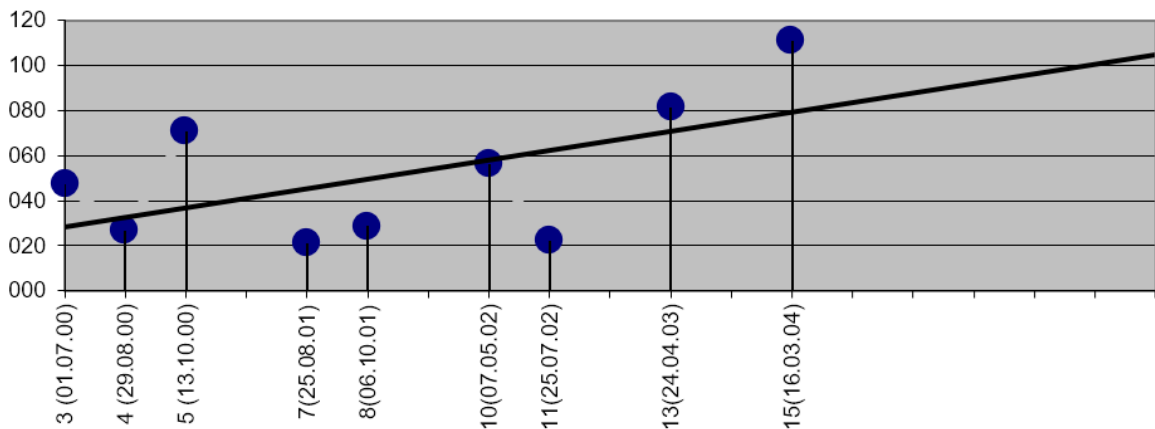
Для поддержания эксплуатационной пригодности и научно-обоснованного планирования затрат на ремонт оборудования стартового комплекса необходимо прогнозирование повреждаемости элементов конструкций. Трещинообразование и дефекты в элементах конструкции стартового комплекса зависят от целого ряда количественных и не количественных (вербальных, неизмеряемых) переменных, системно характеризующих изучаемое явление.

К ним относятся эксплуатационные и метеорологические условия, качество ремонта и др. Прогнозирование повреждаемости элементов конструкции и оборудования стартового комплекса на основе объективной статистики представляет трудную проблему из-за отсутствия эффективных методов, позволяющих «свернуть» разнородную информацию в единое аналитическое выражение.

В условиях воздействия различных по своей природе факторов и существенной неопределенности было принято решение о построении модели изменения суммарной длины трещин, образующихся в газоотводах после пуска ракет космического назначения, путем опроса эксперта на основе разработанной методики [238].



а



б

Рисунок 5.10 – Прогноз изменения суммарной длины трещин в МОГ 24 ПУ на 5 пусков: а – «зимние», б – «летние» пуски

5.2.2 Построение модели суммарной длины трещин в газоотводах

Исходное состояние: по накопленным статистическим данным суммарной длины трещин после пуска РКН строятся регрессии (рис. 5.10) и по ним осуществляется прогноз на несколько пусков вперед.

Требуется: построить модель оценивания состояния газоотводов с учетом экспертных знаний.

Факторное пространство (*задача класса А*) включает шесть входных переменных, наиболее полно соответствующих решению задачи:

X_1 – количество тепловых воздействий;

X_2 – материал (сталь, нержавеющая сталь)

X_3 – качество ремонта металлических конструкций;

X_4 – температура окружающей среды;

X_5 – направление ветра;

X_6 – время воздействия на поверхность.

Входная переменная Y – относительная длина трещин, общая длина в метрах деленная на 100 м. Выбранное факторное пространство обеспечивает расчет обобщенного показателя Y (рисунок 5.11), так как характеризует его с различных сторон, а именно: непосредственное воздействие на объект (X_1, X_6); состояние объекта (X_2, X_3); внешние действующие факторы (X_4, X_5).

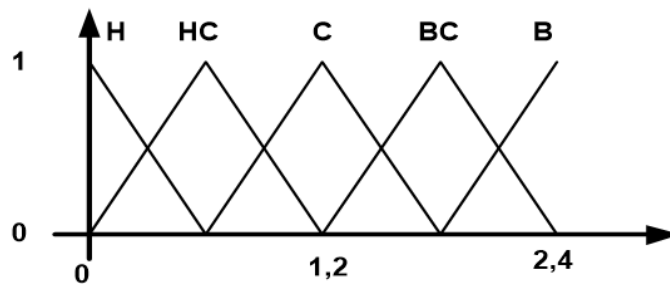


Рисунок 5.11 – Y – относительная длина трещин (сумма в метрах / 100 м)

На рисунке 5.11 введены обозначения: Н – низкая; НС – ниже средней; С – средняя; ВС – выше средней; В – высокая.

Модель изучаемого явления строилась в шестифакторном пространстве нечетких переменных. Согласно предложенной методике (глава 4) эксперт по специально построенной матрице (таблица 5.4), где каждая строка имела импlicative форму типа «Если..., то...», реализовал продукционное правило: «ситуация – решение (действие)» по шкале рисунка 5.11.

Следует отметить, что при заполнении матрицы эксперт в каждой строке учитывал значения не только выбранных в факторном пространстве переменных, но еще множество дополнительной информации, учитывающей приобретенный экспертами профессиональный опыт при эксплуатации наземных объектов космодромов, в том числе и газоотводов. Экспертные знания при этом выступают «достаточно ёмкими», т.е. обобщенными. Понятие «обобщенности» переменной довольно субъективно и зависит, на наш взгляд, в первую очередь от уровня принимаемых решений. Так, например, переменная X_6 – время воздействия на

поверхность газохода – включает в себя информацию о классе ракеты и степени воздействия высокотемпературных газовых струй на стальную обшивку гаотводов.

Далее по разработанным методикам (глава 4) решались *задача класса В* для представления экспертной информации в виде нечетких продукционных правил и *задачи класса В* в виде строк опросной матрицы, формализованных в таблице 5.4 для получения модели изучаемого явления.

Таблица 5.4 - Фрагмент опросной матрицы с оценками эксперта

		Количество предыдущих инцидентов	Марка стали	Качество ремонта	Температура наружного воздуха	Направление ветра	Время воздействия	Относительное количество трещин
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	Y
1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	НС – С
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	В
3	1	-1	1	-1	-1	-1	1	ВС – В
...
30	1	1	-1	1	1	1	-1	Н – НС
31	1	-1	1	1	1	1	-1	Н
32	1	1	1	1	1	1	1	НС – С

После обработки данных опросной таблицы результирующее аналитическое выражение со значимыми коэффициентами приняло вид

$$Y = 1,07 + 0,097x_1 - 0,06x_2 - 0,49x_4 + 0,06x_5 + 0,328x_6 - 0,07x_1x_2 - 0,06x_3x_6 - 0,09x_4x_5 - 0,06x_5x_6 + 0,053x_1x_2x_4 + 0,078x_1x_2x_5. \quad (5.3)$$

Анализ выражения (5.3) подтверждает интуитивно выявленную закономерность, связанную с увеличением общей длины трещин при увеличении тепловых воздействий и усилении неблагоприятных климатических условиях.

Представительность модели по критерию (4.28) дает возможность еще до проверки адекватности оценивать ее полезность.

Расчетное значение критерия, равное 1,38, подтверждает полезность модели в том смысле, что величина изменения зависимой переменной при максимальных отклонениях независимых превышает исходный показатель нечеткости.

Степень адекватности построенной модели проверялась сравнением расчетов, выполненных с использованием модели (5.3), и результатов натуральных замеров суммарной длины трещин в зависимости от величины интенсивности теплового воздействия после остывания, приведенных в актах соответствующих компетентных комиссий.

Проведенная оценка адекватности коэффициентом корреляции с визуализацией на графике (рис.5.12) дает высокое значение 0,96. При этом группировка точек вокруг теоретической линии регрессии – биссектрисе прямого угла, проходящей под 45° , – свидетельствует об отсутствии систематических ошибок.

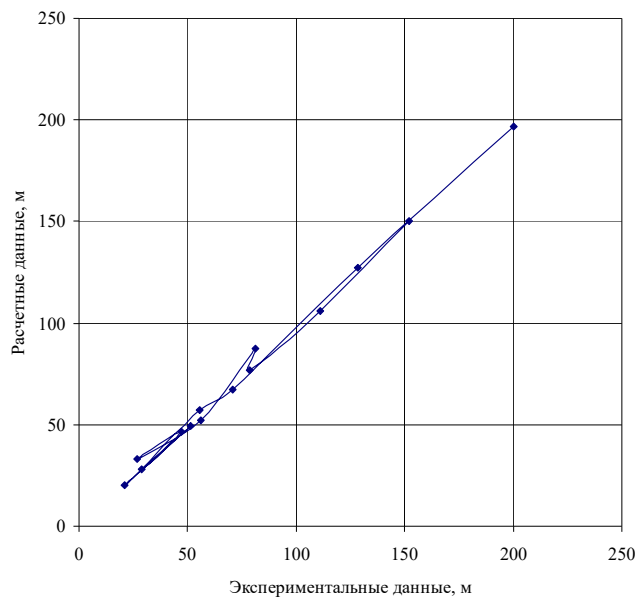


Рисунок 5.12 — Корреляция расчетных и экспериментальных данных

В таблице 5.5 приведены результаты расчетов по полиному и замеры фактической длины трещин после каждого из пусков (космодром «Плесецк»).

Анализ полученных данных таблицы 5.5 убедительно свидетельствует о преимуществе расчетов по модели (5.3) по сравнению с простой однопараметрической моделью.

Таблица 5.5 – Проверка адекватности расчетных значений длины трещин по экспериментальным данным

№ пуска (X_1)	$T_b, ^\circ\text{C}$	Расчетная по модели (5.1) длина трещин ($Y^* 100$), м	Фактическая длина трещин, м	Относит. ошибка, %
3	24,5	46,6	47,1	-1,1
4	25,5	33,2	26,9	+23,3
5	6,6	67,3	70,9	-5,1
6	12,4	57,1	55,3	-8,6
7	20,2	20,0	20,9	-4,8
8	14,4	28,1	28,7	-2,1
9	-11,0	127,0	128,3	-1,0
10	17,0	49,6	51,3	+1,4
11	33,7	52,4	56,0	-6,4
12	-27,0	197,2	200	-1,4
13	26,0	87,3	81,2	+7,5
14	-20,0	76,6	78,8	-2,8
15	-6,0	105,8	111	-4,7
16	-15,0	150,3	152	-1,1

Таким образом, проведенный анализ позволяет рассматривать полином (5.3) как адекватную модель вычисления суммарной длины трещин газоходов после пуска ракет космического назначения.

5.2.3 Прогнозирование суммарных повреждений газоотводов на несколько пусков вперед

На основании полученной модели (5.3) поведено прогнозирование суммарной длины трещин на три пуска вперед. В таблице 5.6 представлены результаты трех численных экспериментов по прогнозированию значений суммарной длины трещин при тепловых воздействиях в условиях предполагаемых температур окружающей среды в зависимости от сезона.

Проведенные исследования показали, что в рамках традиционных подходов, используемых для прогнозирования суммарных повреждений газоотводов на несколько пусков вперед наблюдается существенное завышение значений

суммарных повреждений газопроводов, особенно при благоприятных метеорологических условиях, по сравнению с результатами, полученными при использовании моделей вида (5.3).

Таблица 5.6 – Прогноз значений суммарной длины трещин при предполагаемых тепловых воздействиях в условиях данных температур окружающей среды

№ пуска (прогноз по X_1)	Предполагаемая $T_{в}$, °C	Расчетная по модели длина трещин ($Y*100$), м		Прогноз по статистическим зависимостям пусков*, м
		Благоприятные условия,	Неблагоприятные условия	
17	-20,0	79,6	132,5	165
18	15,0	36,0	67,4	84
19	5,0	49,7	86,4	93

Причины такого несоответствия вполне объяснимы:

- с точки зрения методологии применения статистических методов – однородность объединения результатов воздействия пусков РКН вызывает сомнение, да и сами выборки слишком малы для прогнозных целей;

- с точки зрения извлечения и формализации экспертных знаний – правильно выбранное факторное пространство из 5 переменных, системно характеризующих изучаемое явление, и квалификация эксперта обусловили высокую степень адекватности построенной модели.

Математическая интерпретация выражения (5.3) как функции отклика допускает соответствующее геометрическое представление. В трехмерном пространстве возможна визуализация функции отклика принятия решения экспертом при закреплении остальных переменных на постоянных уровнях.

На рисунке 5.13 представлены поверхности отклика (*задача класса Г*) в трехмерном пространстве неявных экспертных знаний по модели (5.3) в

благоприятных и неблагоприятных условиях остывания газопроводов от переменных X_1, X_4 .

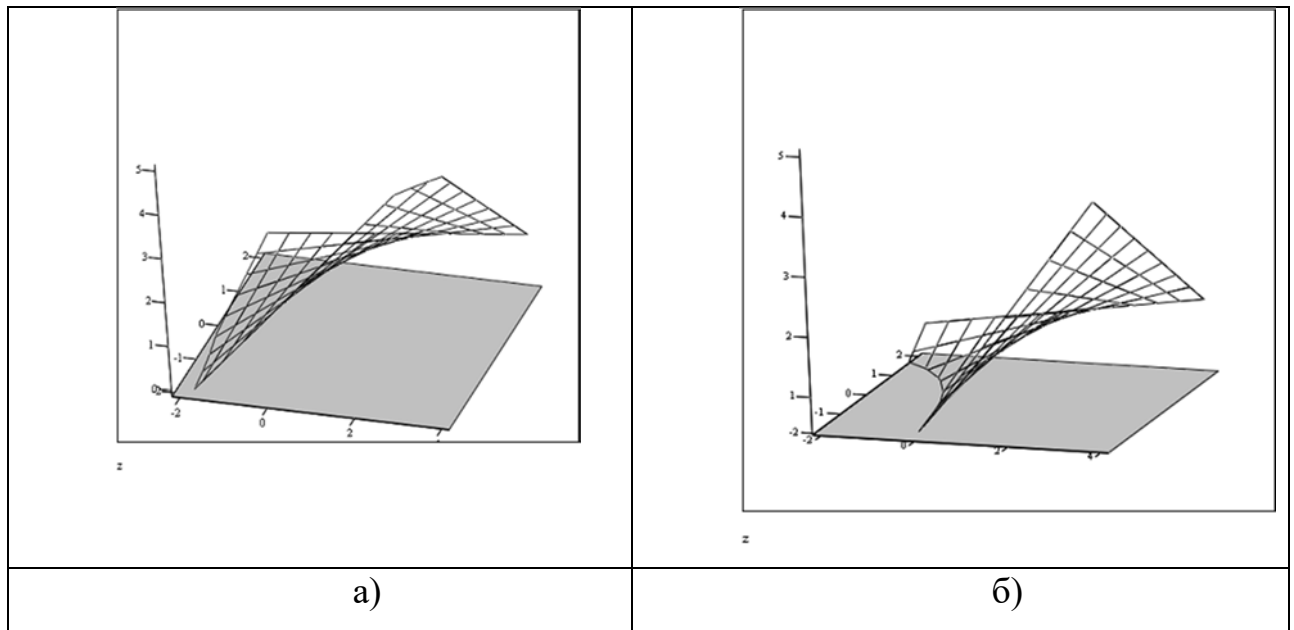


Рисунок 5.13 – Поверхности отклика принятия решения экспертом в благоприятном (а) и неблагоприятном (б) случаях

Анализ поведения поверхностей отклика указывает на существенные различия в логике принятия решения в различных ситуациях. Здесь же, благодаря применению разработанной методике, представляется возможной количественная оценка таких различий.

5.3 МЕТОДИКИ ОЦЕНИВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ХИМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА НА БАЗЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Принятая система оценивания технического состояния химических источников тока осуществляется на основе выборочного контроля, который предусматривает проведение испытаний с разрушением приборов. Это приводит к большим временным и экономическим затратам.

Настоящее исследование проведено в условиях космодрома «Плесецк» и состоит из двух частей: методики оценивания технического состояния химических источников тока (ХИТ) элементов энергоснабжения СЛЮ с построением

соответствующих моделей оценивания их состояния и собственно методики прогнозирования остаточного ресурса ХИТ на ее основе [117-119,204,246].

5.3.1 Постановка задачи

Химические источники тока (ХИТ) относятся к элементам системы энергоснабжения объектов наземной космической инфраструктуры как СЛО. Одним из необходимых элементов, обеспечивающих функционирование большинства современных сложных технических комплексов, является система энергоснабжения. Для обслуживания электропитанием наиболее ответственных потребителей сложных технических комплексов широкое применение получили ХИТ.

Основная задача, выполняемая ХИТ, состоит в обеспечении функционирования специальной аппаратуры во всех режимах ее работы, при этом они должны быть надежны и безопасны в эксплуатации [118,119, 204,246].

В процессе эксплуатации показатели, характеризующие работоспособное состояние ХИТ, неизбежно ухудшаются: падает среднее напряжение, уменьшается электрическая емкость, снижаются удельные характеристики.

Основной причиной сокращения срока службы ХИТ является протекание нежелательных процессов, приводящих к искажению оптимальной структуры активных масс, заложенных при его изготовлении, изменению их фазового состава и пассивации электродной поверхности. Все эти процессы приводят к снижению коэффициентов использования активных веществ и к сокращению рабочей поверхности электродов. Одним из основных признаков исчерпания срока службы становится снижение фактической емкости ХИТ ниже требуемого уровня [118].

Для оценивания состояния ХИТ существует множество характеристик, систематизированных в таблице 5.7.

Данная таблица составлена с учетом требований нормативно-технической и эксплуатационной документации на различные типы ХИТ, а также содержания научно-технической литературы, посвященной основам устройства и правилам эксплуатации ХИТ. При этом характеристики могут быть как количественными,

так и неколичественными (вербальными, неколичественными), что осложняет применение обычных математических методов анализа их состояния.

Таблица 5.7 – Список характеристик при оценивании ТС ХИТ

Количественные характеристики:	Неколичественные характеристики:
<ul style="list-style-type: none"> -продолжительность срока службы, количество проведенных циклов; -фактическая величина электрической емкости; -состояние электрических цепей сигнализирующих датчиков; -величина внутреннего сопротивления; -величина токов утечки; -значение напряжения разомкнутой цепи; -величина сопротивления изоляции между электрическими цепями и корпусом батареи, электрическими цепями и цепями сигнализирующих устройств; -величина разбаланса энергетических характеристик между аккумуляторами в батарее. 	<ul style="list-style-type: none"> -наличие короткого замыкания в одном или нескольких аккумуляторах батареи (КЗ); -режим эксплуатации (циклирование, буферный, резерв); -химический состав электролита; -наличие признаков разгерметизации (вздутие аккумуляторов, подтеки электролита); -наличие признаков коррозии корпуса, нарушение лакокрасочного покрытия; -состояние контактных соединений аккумуляторов (окислы, пленки, ослабление болтовых соединений и т.д.); -состояние предохранительных устройств; -состояние изделия в целом (отсутствие видимых признаков механических повреждений, сколов, трещин, вмятин, состояние кабельной сети, соединительных элементов наличие пломбировки предприятия-изготовителя); -наличие признаков «зашламления» аккумуляторов.

Построение базы знаний интеллектуальной информационно-диагностической системы оценивания состояния ХИТ в условиях существенной неопределенности на базе экспертных знаний позволяет минимизировать объем разрушающего контроля.

5.3.2 Разработка методики неразрушающего контроля при оценивании технического состояния ХИТ

Исходное состояние: оценивание состояния ХИТ производится специальными комиссиями выборочным контролем с нарушением целостности установок.

Требуется: создать методику неразрушающего контроля на основе модели оценивания состояния ХИТ.

Методика построения алгоритмического обеспечения для оценки состояния ХИТ основана на реализации метода построения моделей в виде аналитического выражения на базе экспертных знаний, изложенного в главах 2-4.

Из обозначенного списка, приведенного в таблице 5.7, для оценки состояния ХИТ экспертом выделены признаки наиболее существенные в плане информативности, которые составили факторное пространство для последующего создания модели [119]:

X_1 – продолжительность срока службы, (количество циклов);

X_2 – величина интегрального теплового потока от характерного участка поверхности 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 контактных соединений (величина коэффициента дефектности);

X_6 – режим эксплуатации;

X_7 – наличие признаков разгерметизации (вздутие аккумуляторов, подтеки электролита), наличие признаков коррозии корпуса, нарушение лакокрасочного покрытия;

Y – интегральная оценка состояния ХИТ.

По мнению эксперта данное факторное пространство интегративно представляет состояние исследуемого объекта: переменные $X_2 - X_4$ характеризуют

внутреннее состояние ХИТ; X_5 и X_7 – проявление негативных явлений; X_1 и X_6 – воздействие внешних условий.

Особенностью данного примера является введение в факторное пространство переменных, основанных на обработке тепловизионных съемок, которые обеспечивают получение новой информации (рис.5.14).

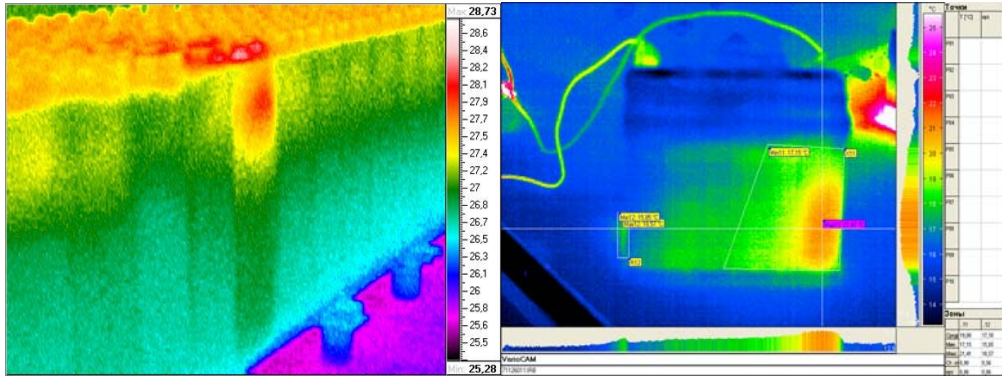


Рисунок 5.14 - Типичные кадры тепловизионной съемки для определения X_2 и X_5 : слева – отдельный аккумулятор; справа – батарея аккумуляторов

На этапе выбора и формализации Y введена ранжированная шкала оценивания состояния ХИТ. При этом область определения Y (рисунок 5.15) была разбита на участки в интервале $[0,1]$, а в таблице 5.8 установленным описательным характеристикам поставлены в соответствие количественные значения с нечеткими границами. При попадании в зону неопределенности результирующее значение оценки будет отнесено к интервалу с более жесткой характеристикой.

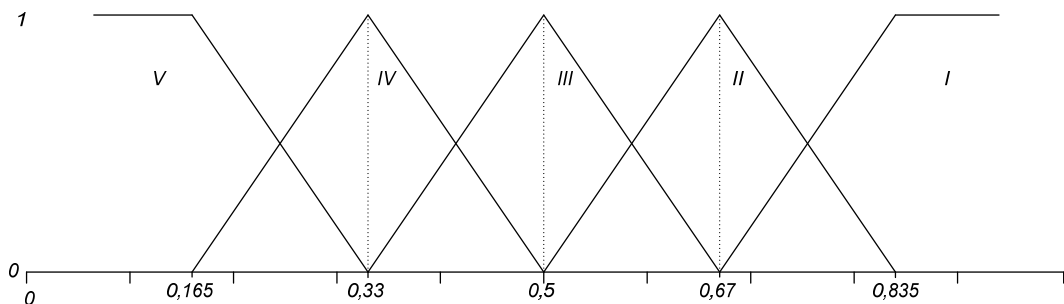


Рисунок 5.15 – Y как лингвистическая переменная и шкала интегральной оценки состояния ХИТ

Таблица 5.8 – Шкала нечетких значений интегральной оценки состояния ХИТ

№ состояния	Границы интервала	Мода интервала	Наименование термножества	Характеристика состояния
I	$1,0 \div 0,67$	$0,835$	<i>Выше нормы</i>	Фактические значения некоторых параметров, характеризующих ТС ХИТ, несколько превышают значения, установленные в ЭД на изделие.
II	$0,84 \div 0,5$	$0,67$	<i>Норма</i>	Фактические значения основных параметров, характеризующих ТС ХИТ, в основном соответствуют значениям, установленным в ЭД на изделие. Незначительные замечания по результатам обследования устраняются на месте в незначительном объеме ремонтно-восстановительных работ (РВР).
III	$0,67 \div 0,33$	$0,5$	<i>Ниже нормы, в пределах допуска</i>	Фактические значения основных параметров, характеризующих ТС ХИТ, незначительно ниже значений, установленных в ЭД на изделие, но позволяют дальнейшую эксплуатацию в составе специальной аппаратуры при условии проведения восстановительных мероприятий на месте (отправка на предприятие - изготовитель для проведения РВР не требуется).
IV	$0,5 \div 0,16$	$0,33$	<i>Предельное состояние</i>	Фактические значения основных параметров, характеризующих ТС ХИТ, не соответствуют установленным в ЭД на изделие, проведение восстановительных работ на месте не позволит восстановить работоспособность изделия в полном объеме, необходимо проведение РВР на предприятии – изготовителе.
V	$0,33 \div 0$	$0,165$	<i>Дальнейшая эксплуатация недопустима</i>	Фактические значения основных параметров, характеризующих ТС ХИТ, не соответствуют установленным в ЭД на изделие, проведение РВР нецелесообразно по причине невозможности восстановления работоспособного состояния изделия.

Следующим этапом разработки модели является составление матрицы экспертного опроса, фрагмент которой вместе с экспертными оценками приведен в таблица 5.9.

Достоинствами опросной матрицы, как показано в главе 3, являются свойства ортогональности и ротатабельности.

Таблица 5.9 – Фрагмент опросной матрицы с оценками эксперта

№ п/п	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	Y
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	0,165
2	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0,165
3	-1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	0,33
4	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	0,67
.								
61	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	0,33
62	+1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	0,33
63	-1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	0,5
64	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	0,835
65	0	0	0	0	0	0	0	0,5

По результатам обработки данных матрицы (таблица 5.9) получено полиномиальное выражение для расчета текущего значения состояния ХИТ:

$$\begin{aligned}
 Y = & 0,416 + 0,0787x_1 + 0,1313x_2 + 0,0313x_4 + 0,0102x_6 + 0,0948x_7 \\
 & + 0,0154x_1x_4 - 0,0106x_1x_5 - 0,0257x_1x_6 + 0,0105x_2x_5 - 0,0106x_3x_5 \\
 & + 0,0107x_4x_6 + 0,0105x_4x_7 - 0,0107x_1x_2x_7 + 0,0104x_1x_2x_6 \\
 & - 0,011x_1x_2x_7 - 0,0106x_1x_3x_4 + 0,0154x_2x_4x_7 + 0,0209x_3x_4x_5 \\
 & + 0,0101x_3x_5x_6 - 0,0107x_3x_5x_7.
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

Проведенный расчет показал, что критерий корректности модели (4.28) выполняется.

Проверка степени адекватности полученного полиномиального разложения (5.4) проведена прямым сравнением расчетов (таблица 5.10) с результатами работы специальной комиссии по технической ревизии ХИТ 27НКМ-100 о возможности продления сроков их эксплуатации.

В таблице 5.10 представлены результаты обследования выборки ХИТ в количестве 30 изделий. Как следует из сравнения данных, расчеты практически полностью совпадают с мнением компетентной комиссии.

Из этого следует, что полученное выражение можно считать моделью изучаемого явления.

Таблица 5.10 – Сходимость оценок комиссии и расчетов по модели (5.4)

№ п/п	Год выпуска	Кол-во дефектн. аккумуля.		Емкость изделия А/ч	Режим эксплуатац.	Решение комиссии	Оценивание по модели	
		по НРЦ	по теч и				ОПТС Y	Принадлеж. к терму по ОПТС
1	1988	3	4	10	Буферный	Не допуск	0,039	Дальнейшая эксплуат. недоп.
2	1988	8	2	15	Буферный	Не допуск	0,093	Дальнейшая эксплуат. недоп.
...
11	1979	23	-	8	Буферный	Не допуск	0,075	Дальнейшая эксплуат. недоп.
...
17	1987	-	2	87	Буферный	Не допуск	0,302	Предельное состояние
18	1987	2	1	90	Буферный	Не допуск	0,337	Предельное состояние
19	1987	27	-	8	Буферный	Не допуск	0,146	Дальнейшая эксплуат. недоп.
20	1987	9	-	25	Буферный	Не допуск	0,204	Дальнейшая эксплуат. недоп.
21	1997	-	-	110	Хранение		0,640	Норма
22	1987	-	1	95	Буферный	Не допуск	0,352	Дальнейшая эксплуат. недоп.
27	1987	-	-	50	Буферный	Не допуск	0,309	Дальнейшая эксплуат. недоп.
28	1987	-	-	85	Буферный		0,448	Предельное состояние
...
30	2002	-	-	78	Буферный		0,555	Ниже нормы

С методологической точки зрения следует отметить, что выводы комиссии о возможности (да) или невозможности (нет) использования изделия носят не количественный характер. Поэтому сравнения в данном случае проведены только ситуационно. При этом можно подчеркнуть высокую квалификацию эксперта, знания которого были использованы при построении модели вида (5.4), т.к. ни одно из фактически негодных устройств не было оценено по данной модели положительно.

Используя (5.4) как модель, проведем более глубокий анализ состояния ХИТ.

Сравнительный анализ данных таблицы 5.10 показывает, что вычисленные значения интегрального показателя качества ХИТ по (5.4) представляют текущий уровень состояния изделий количественно, что дает возможность более обоснованно принимать решение о продлении сроков их эксплуатации. При этом на основе результатов мониторинга текущего уровня состояния изделий с использованием построенной модели можно осуществить прогнозирование состояния ХИТ и заблаговременно спланировать порядок замены ХИТ, состояние которых оценивается между терм-множествами «Предельное состояние» и «Дальнейшая эксплуатация недопустима».

Например, в случаях с изделиями 22 и 27, как видно из таблицы 5.10, могло быть принято решение о продлении сроков их эксплуатации при условии проведения ремонта на предприятии-изготовителе и дальнейшей эксплуатации их в составе аппаратуры, выполняющих менее ответственные функции или в менее интенсивных режимах, а составные элементы изделия 27 возможно использовать для восстановления работоспособности других изделий или пополнения запасных комплектующих.

Такое положение можно объяснить тем, что, согласно инструкции, заключение комиссии основывалось на оценке только лишь показателей, указанных в эксплуатационных документах на изделия, т.е. путем сравнения текущего уровня показателей с их допусковыми значениями.

Очевидное преимущество агрегированного (обобщенного) показателя, позволяющего производить интегральное оценивание состояния изделий в целом,

как раз и состоит в вооружении членов комиссии новым инструментом для оперативного принятия более обоснованных решений.

5.3.3 Разработка методики прогнозирования остаточного ресурса ХИТ

Помимо оценивания фактического состояния ХИТ, модель (5.4) позволяет получать новую информацию и на ее основе создать методику оценивания остаточного ресурса эксплуатации исследуемого объекта.

Методика прогнозирования остаточного ресурса ХИТ с использованием полученной модели (5.4) состоит в следующем [118,119,246].

Шаг 1. Находятся частные производные (5.4) по всем входящим в него переменным:

$$\left. \begin{aligned} \partial Y / \partial x_1 &= 0,0787 + 0,0154x_4 - 0,0106x_5 - 0,0257x_6 + 0,0104x_2x_6 - 0,0217x_2x_7 - 0,0106x_3x_4; \\ \partial Y / \partial x_2 &= 0,1313 + 0,0105x_5 + 0,0104x_1x_6 - 0,0217x_1x_7 + 0,0154x_4x_7; \\ \partial Y / \partial x_3 &= -0,0106x_5 - 0,0106x_1x_4 + 0,0209x_4x_5 + 0,0101x_5x_6 - 0,0107x_5x_7; \\ \partial Y / \partial x_4 &= 0,0313 + 0,0154x_1 + 0,0107x_6 + 0,0105x_7 - 0,0106x_1x_3 + 0,0154x_2x_7 \\ &+ 0,0209x_3x_5; \\ \partial Y / \partial x_5 &= -0,0106x_1 + 0,0105x_2 - 0,0106x_3 + 0,0209x_3x_4 + 0,0101x_3x_6 \\ &- 0,0107x_3x_7; \\ \partial Y / \partial x_6 &= 0,0102 - 0,0257x_1 + 0,0107x_4 + 0,0104x_1x_2 + 0,0101x_3x_5; \\ \partial Y / \partial x_7 &= 0,0948 + 0,0105x_4 - 0,0217x_1x_2 + 0,0154x_2x_4 - 0,0107x_3x_5. \end{aligned} \right\} (5.5)$$

Шаг 2. Рассчитывается градиент Y по фактическому состоянию на момент обследования:

$$\text{grad}(Y) = \sqrt{\sum (dY/dx_i)^2}. \quad (5.6)$$

Шаг 3. Вводится коэффициент относительного времени оставшегося ресурса τ_i для i -го случая в виде выражения:

$$\tau_i = (Y_i - Y_{\text{пред}}) / \text{grad}(Y_i), \quad (5.7)$$

где $Y_{\text{пред}}$ — значение состояния ХИТ, соответствующее переходу изделия в предельное состояние.

Шаг 4. Рассчитывается прогнозируемый срок эксплуатации изделия:

$$t_{\text{прогн}} = t_{\text{гар}} \tau_i^{\text{факт}} / \tau^{\text{гар}}, \quad (5.8)$$

где $t_{\text{гар}}$ – гарантийный срок эксплуатации изделия;

$\tau_i^{\text{факт}}$ – фактическое значение коэффициента относительного времени оставшегося ресурса на момент проведения обследования;

$\tau^{\text{гар}}$ – значение коэффициента относительного времени оставшегося ресурса по гарантийным данным.

5.3.4 Апробация методики прогнозирования остаточного ресурса ХИТ

Численный эксперимент для проверки адекватности предлагаемой методики прогнозирования остаточного ресурса ХИТ был проведен с использованием ретроспективных статистических данных и состоял в следующем.

Рассчитывались варианты изменения значений состояния ХИТ по (5.4) для трёх различных временных отрезков:

Y_{-2} – соответствует времени за 2 года до T_0 ;

Y_0 – соответствует времени проведенной оценки T_0 ;

Y_{+2} – соответствует времени оценки после T_0 на 2 года вперед.

Значения компонент факторного $x_1 \dots x_7$ пространства для варианта Y_{-2} рассчитывались интерполяцией, а Y_{+2} – экстраполяцией.

Графически зависимости оставшегося ресурса на основе расчетов по изложенной методике для 4-х изделий представлены на рисунке 5.16. На данном рисунке наглядно продемонстрирован процесс перехода изделий из одного регламентированного состояния в другое регламентированное состояние (рисунок 5.16, верхняя часть), а также процесс потери работоспособности (рисунок 5.16, нижняя часть) во времени.

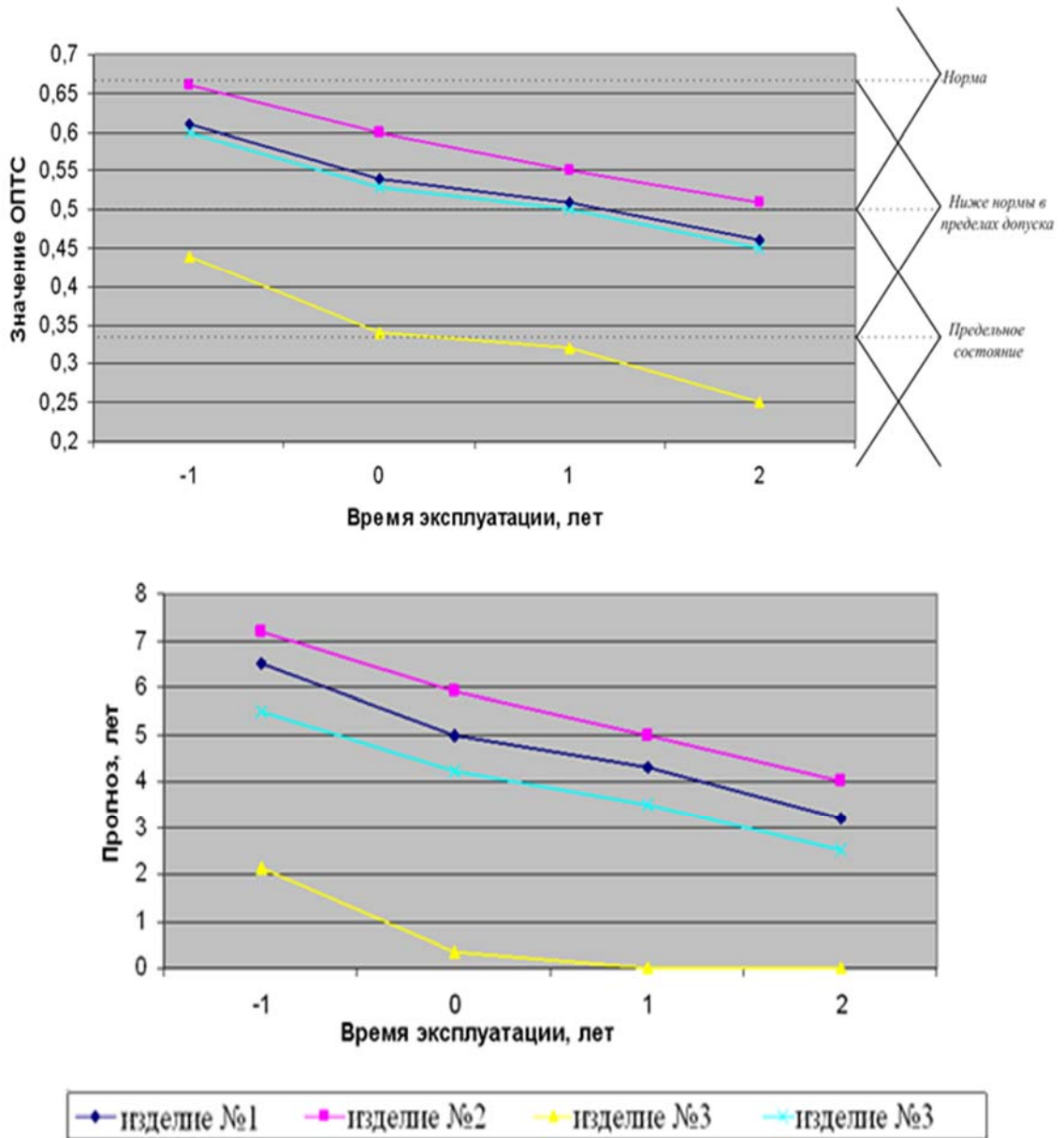


Рисунок 5.16 – Изменение состояния ХИТ (а) и прогнозируемого срока его эксплуатации (б)

На рисунке 5.17 представлен график зависимости прогнозируемого остаточного ресурса от величины агрегированного (обобщенного) показателя Y . Анализ поведения точек на графике указывает на линейную зависимость между переменными с коэффициентом корреляции 0,93.

Проведенные исследования по созданию ИИДС позволяют сделать некоторые выводы.

На базе предложенного метода оценивания состояния СЛО с использованием

неявных ЭЗ разработана методика агрегированного (обобщенного, интегрального) оценивания состояния ХИТ. По данной методике построена адекватная полиномиальная модель, позволяющая получать количественные оценки состояния ХИТ в любой необходимый момент времени на основе анализа текущих значений их параметров, *минуя* разрушающий контроль.

Этому способствует также включение в факторное пространство переменных x_2 и x_5 , определяемых по тепловизионным определениям и *не требующих применения разрушающих методов* [118,119,246].

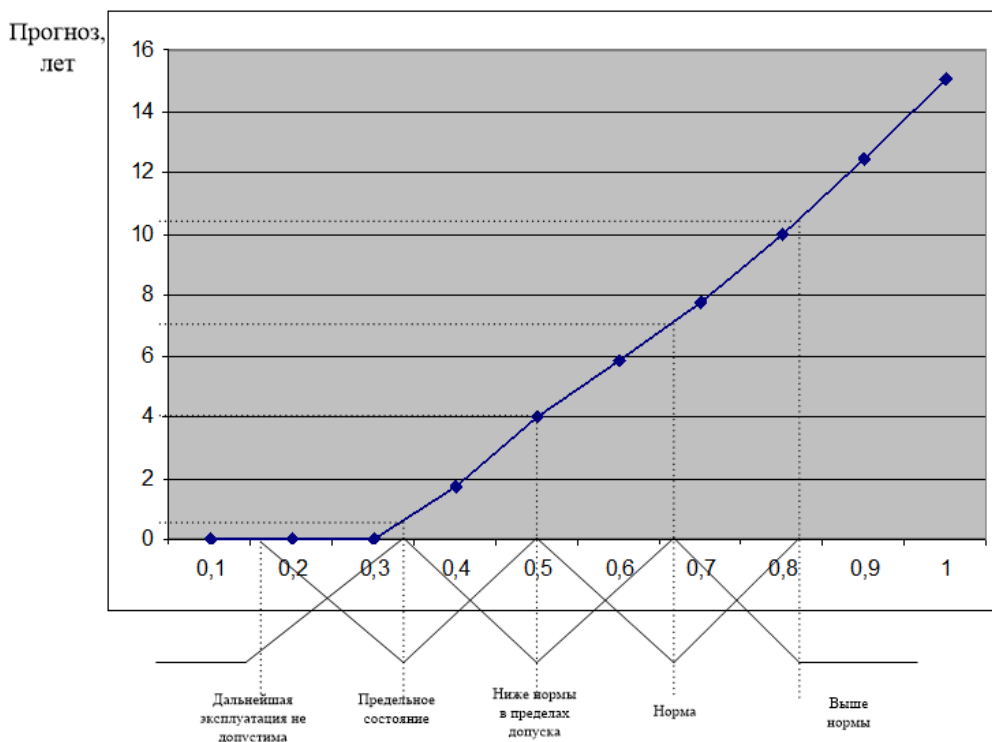


Рисунок 5.17 – Изменение прогнозируемого остаточного ресурса (годы) от величины фактического значения состояния ХИТ

Количественное оценивание состояния ХИТ в многомерном пространстве нечетких переменных позволяет проводить мониторинг изделий, что дает основание для выработки гибкой стратегии эксплуатации объектов исследования. При этом вырабатывается принципиально новая обобщенная информация для принятия комиссией более обоснованных решений о возможности продления сроков эксплуатации изделий [118,119,246].

Модель (5.4) послужила *базой знаний* при построении интеллектуальной информационно-диагностической системы для ведения мониторинга и прогнозирования остаточного ресурса ХИТ *без разрушающего контроля*.

По результатам исследований получен патент РФ № 2467436 от 20.11.2012 [117].

5.4 ОЦЕНИВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЕННОГО ОБЪЕКТА

Пространственно-распределенные объекты особенно типичны в строительном деле. К ним относятся молниеотводы (диверторы), фермы освещения, башни обслуживания, дымовые трубы теплоэлектростанций и металлургических заводов и др. Естественно, что различные элементы таких сооружений, находясь в индивидуальных условиях их эксплуатации, ведут себя существенно различно. Ниже рассмотрен пример оценивания технического состояния пространственно-распределенного объекта по высоте – дымовой трубы металлургического завода, эксплуатируемой в жестких климатических условиях Крайнего Севера [93,99,101,102,118,273].

Именно поэтому для оценивания состояния дымовых труб используются экспертные знания и опыт, а заключения носят преимущественно неколичественный характер. Отсутствие доказательного количественного обоснования и высокая стоимость выполнения таких работ существенно снижает эффективность их применения.

Исходное состояние: оценивание состояния дымовой трубы производится специальными комиссиями органолептически.

Требуется: создать методику оценивания и прогнозирования состояния как отдельных составных частей объекта, так и пространственно-распределенного объекта в целом.

5.4.1 Краткая характеристика объекта и проблемы оценивания его состояния в условиях неопределенности

Дымовая труба предназначена для обслуживания отражательной печи, а позднее также печи Ванюкова (ПВ) Плавильного цеха Медного завода. Эти пирометаллургические процессы цветной металлургии весьма энергоемки, обладают большими единичными мощностями и большим объемом эвакуируемых печных газов через дымовые трубы в атмосферу.

Высота трубы – 176,0 м. Фундамент трубы железобетонный сборный с толщиной стенок 5,5 м, а стенки ствола – от 3630 до 353 мм.

Материал ствола по отметкам:

«-1,0» - 21,0 м – бетон М200;

21,0 - 99,0 м – кирпич пластического прессования М200;

99,0 - 145,0 м – кирпич пластического прессования М150;

145,0 - 176,0 м – кислотоупорный кирпич.

Стяжные кольца из полосовой стали марки 09Г2С сечением 100 на 10 мм расположены с шагом 0,5 - 1,5 м по высоте трубы.

Объект эксплуатируется в условиях Крайнего Севера, где перепад температур наружного воздуха от -53 до $+40^{\circ}\text{C}$ и более 270 ветренных дней..

В связи с производственной необходимостью на дымовую трубу стали подавать отходящие газы после «мокрой газоочистки», не предусмотренные при проектировании трубы [93].

Особенности составов и температурных режимов таковы, что могут вступать в реакции взаимодействия с кладкой трубы.

Под негативным действием процессом замораживания-оттаивания влаги при высоком градиенте температур газовых потоков (до 90°C) и наружного воздуха происходит разрушение кладки с образованием вертикальных трещин, разрывы стяжных колец и раскрытие оголовка устья трубы. В дополнение ко всему неверное инженерное решение, связанное с использованием в наружной стенке ствола материалов с различными прочностными характеристиками, привело к развитию деформации кладки наружной стенки ствола.

Часть наблюдаемых дефектов показана на рисунке 5.18.

Дымовая труба эксплуатируется в крайне тяжелых условиях, что приводит к аварийным ситуациям, поскольку данный объект находится на территории завода и в непосредственной близости от города.

Таким образом, объект исследования относится к классу сооружений повышенной опасности и требует особого внимания в части оценки его надежности и функциональных характеристик. Кроме того, объект относится также к пространственно-распределенным, поскольку высота дымовой трубы составляет 176 м, что требует нового подхода к разработке методики оценивания его состояния в целом. Наиболее подходящим в даннослучае является разделение его на составные элементы, построение для каждого из элементов своей модели с последующим объединением их в единую модель.

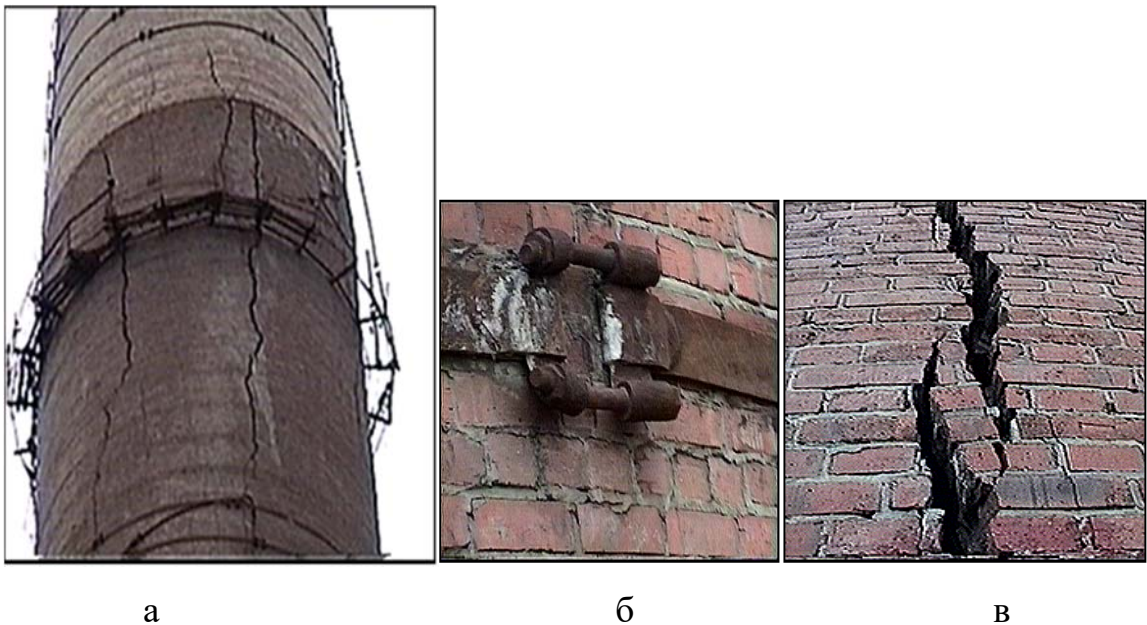


Рисунок 5.18 – Проявление негативного развития технического состояния дымовой трубы: а – общая картина объекта с вертикальными трещины и высолами по телу трубы; б – деформация замка стяжного кольца; в – вертикальная трещина

5.4.2 Предварительные исследования для синтеза модели оценивания состояния пространственно-распределенного объекта

Методика построения модели оценивания состояния объекта в целом заключалась в следующем. Ствол дымовой трубы был разделен на равные по высоте элементы, поскольку элементы однотипны, то и состояния элементов описывались одной моделью. Модель оценивания состояния пространственно-распределенного объекта в целом строилась по вычисленным значениям состояния каждого элемента, которые сводились затем в единую модель путем графического объединения.

Определение факторного пространства

Согласно алгоритму построения модели состояния СЛО, представленному на рис.4.6, сначала эксперт определяет факторное пространство переменных, в которых он принимает решение о состоянии объекта.

Проблема выбора метода моделирования в условиях учета преимущественно неколичественной информации и получения четко обоснованных решений привела к необходимости построения математической модели состояния дымовой трубы как СЛО [1,2,27,99,101,102,224].

Определение факторного пространства принятия решений

В качестве выходной переменной Y была выбрана обобщенная оценка состояния СЛО (в данном случае дымовой трубы) с точки зрения степени ее безопасности по отношению к производственному процессу и окружающей среде.

В нечетком виде возможные значения выходной переменной Y представлены на рисунке 5.19.

Приведенная градация позволяет легко сравнивать расчетные значения с нормативными и переводить их в количественные величины, а также имеет ясную физическую природу и не противоречит здравому смыслу.

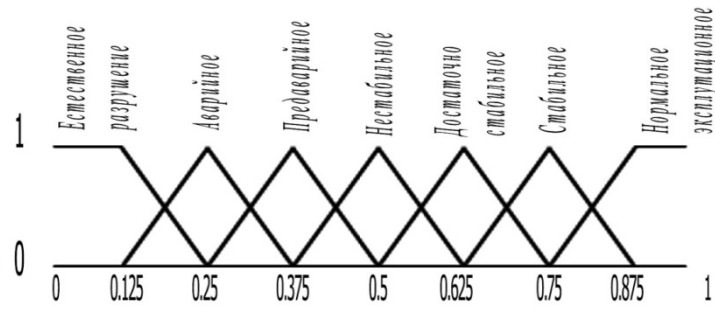


Рисунок 5.19 – Представление Y в виде лингвистической переменной

В таблице 5.11 показано нормирование оценок технического состояния объекта Y с учетом неопределенности и нечеткости границ [27,94,188,206-208].

В качестве входных переменных выступают следующие показатели состояния СЛО [27,188,206-208]:

- уровень (степень) деформации стяжных колец;
- градиент изменения (накопления) общего количества дефектов;
- марка материалов наружной стенки ствола;
- наличие трещин в наружной стенке, длина и угол их наклона;
- наличие областей концентрации продуктов выброса на футеровке;
- ширина раскрытия трещин в наружной стенке ствола;
- линейная ориентация макротрещин (вертикальная или горизонтальная);
- градиент раскрытия трещин;
- состояние футеровки, наличие зон ее разрушения;
- состояние теплоизолирующего слоя между футеровкой и наружной стенкой ствола.
- наличие высолов и зон увлажнения (промерзания) в наружной стенке ствола и на опорных выступах футеровки.

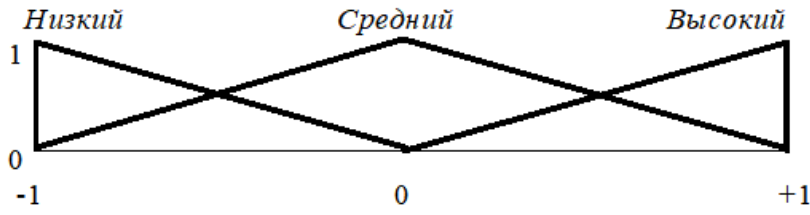
Таблица 5.11 – Шкала нечетких значений Y – оценка состояния дымовой трубы

Границы участка	Характеристика состояния	Косвенные признаки изменения состояния
1,0-0,75	Нормальное эксплуатационное	Основные и вспомогательные конструктивные элементы не имеют дефектов и повреждений. Эксплуатационные характеристики, конструктивная схема и прочностные характеристики материалов полностью соответствуют проектным. Деформации и повреждения практически отсутствуют. Показатель дефектности 0-20%.
0,875-0,625	Стабильное	Основные конструктивные элементы не имеют дефектов и повреждений. Отмечаются незначительные дефекты у вспомогательных элементов. Эксплуатационные характеристики, конструктивная схема и прочностные характеристики материалов полностью соответствуют проектным. Деформаций и повреждений нет. Показатель дефектности 20-30%.
0,75-0,5	Нестабильное	Имеются незначительные дефекты и повреждения как у основных, так и вспомогательных конструктивных элементов. Эксплуатационные характеристики и конструктивная схема в основном соответствуют проектным. Отмечается снижение прочностных характеристик материалов и незначительные деформации. Показатель дефектности 30-40%.
0,625-0,375	Крайне нестабильное	Имеются отдельные дефекты у основных и значительные повреждения у вспомогательных конструктивных элементов. Отмечается несоответствие эксплуатационных условий, конструктивной схемы и прочностных характеристик материалов проектным. Отмечаются деформации и повреждения. Показатель дефектности 40-50%.
0,5-0,25	Предаварийное	Имеются значительные дефекты и повреждения как у основных, так и у вспомогательных конструктивных элементов. Эксплуатационные условия, конструктивная схема и прочностные характеристики не соответствуют проектным. Отмечаются значительные деформации и повреждения основных конструктивных элементов. Показатель дефектности 50-60%.

0,375- 0,125	Аварийное	Имеются значительные дефекты и повреждения у основных и вспомогательных конструктивных элементов, несоответствие эксплуатационных условий и конструктивной схемы проектным. Прочностные характеристики материалов несущих конструкций не соответствуют проектным. Наблюдаются значительные деформации и разрушения. Показатель дефектности 60-70%.
0,25-0	Естественное разрушение	Имеются многочисленные дефекты как у основных, так и вспомогательных конструктивных элементов. Эксплуатационные характеристики и конструктивная схема не соответствуют проектным. Прогрессирующий рост деформаций и разрушений. Показатель дефектности 70-90%.

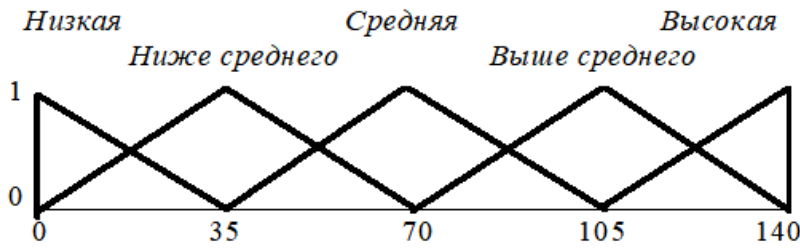
В факторное пространство (рисунок 5.20) включены пять наиболее существенных переменных:

- X_1 – уровень деформации стяжных колец (неколичественная переменная);
- X_2 – ширина раскрытия трещин (мм);
- X_3 – градиент раскрытия трещин (мм/год);
- X_4 – градиент изменения общего количества дефектов (неколичественная переменная);
- X_5 – материал наружной стенки ствола (неколичественная переменная).



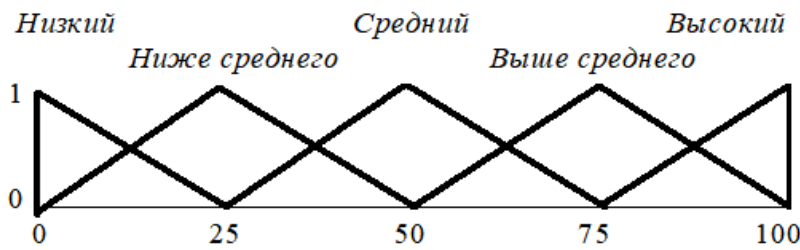
X₁ - уровень деформации колец

$$x_1 = \begin{cases} -1 & \text{норма} \\ +1 & \text{разрушение} \end{cases}$$



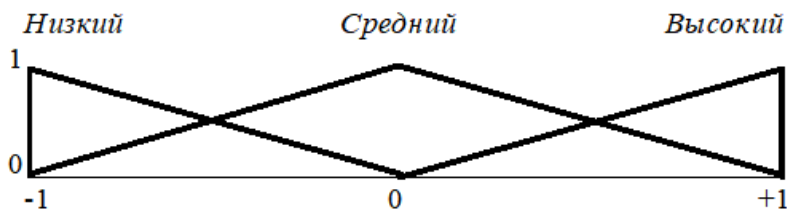
X₂ - ширина раскрытия трещин

$$x_2 = \frac{X_2 - 70}{70}$$



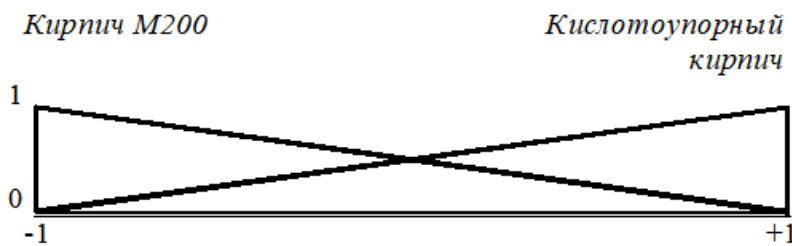
X₃ - градиент раскрытия трещин

$$\delta_3 = \frac{X_3 - 50}{50}$$



X₄ - градиент изменения общего количества дефектов

$$x_4 = \begin{cases} -1, & \text{низкий} \\ +1, & \text{высокий} \end{cases}$$



X₅ - материал наружной стенки ствола

$$x_5 = \begin{cases} -1, & \text{кирпич М 200} \\ +1, & \text{к / уп. кирпич} \end{cases}$$

Рисунок 5.20 – Представление входных переменных лингвистическом виде

5.4.3 Построение модели состояния элемента СЛО

Матрицу экспертного опроса представляет матрица полного факторного эксперимента типа 2^n , где n – число факторов [7,8, 210]. Фрагмент опросной матрицы в лингвистическом виде с оценками эксперта представлен в таблице 5.12.

Таблица 5.12 – Фрагмент опросной матрицы в вербальном виде

№ № п/п	Уровень деформации стяжных колец	Ширина раскрытия трещин	Градиент раскрытия трещин	Градиент изменения общего количества дефектов	Материал наружной стенки ствола	Оценка состояния СЛО
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	Y
...
13	<i>Высокий</i>	<i>Низкий</i>	<i>Высокий</i>	<i>Высокий</i>	<i>Кирпич М200</i>	<i>Аварийное</i>
14	<i>Низкий</i>	<i>Низкий</i>	<i>Высокий</i>	<i>Высокий</i>	<i>Кирпич М200</i>	<i>Нестабильное</i>
15	<i>Низкий</i>	<i>Высокий</i>	<i>Высокий</i>	<i>Высокий</i>	<i>Кирпич М200</i>	<i>Ест. разрушение</i>
16	<i>Высокий</i>	<i>Высокий</i>	<i>Высокий</i>	<i>Высокий</i>	<i>Кирпич М200</i>	<i>Ест. разрушение</i>
17	<i>Низкий</i>	<i>Низкий</i>	<i>Низкий</i>	<i>Низкий</i>	<i>К/уп. Кирпич</i>	<i>Норм. эксплуатац.</i>
18	<i>Высокий</i>	<i>Низкий</i>	<i>Низкий</i>	<i>Низкий</i>	<i>К/уп. Кирпич</i>	<i>Норм. эксплуатац.</i>
19	<i>Низкий</i>	<i>Высокий</i>	<i>Низкий</i>	<i>Низкий</i>	<i>К/уп. Кирпич</i>	<i>Стабильное</i>
...

Более компактная форма опросной таблицы, пригодной для компьютерной обработки, приведена в таблице 5.13.

Перевод вербальных оценок эксперта в числовые оценки по шкале, представленной на рисунке (5.19), с последующей обработкой полученных данных методами теории планирования экспериментов дает возможность синтеза полиномиальной модели оценивания и прогнозирования состояния дымовой трубы во времени.

Таблица 5.13 – Компактная форма таблицы 5.12 с оценками эксперта

№ п/п	Уровень деформации стяжных колец	Ширина раскрытия трещин	Градиент раскрытия трещин	Градиент изменения общего количества дефектов	Материал наружной стенки ствола	Вербальная оценка состояния СЛО
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	Y
...
13	-1	-1	+1	+1	-1	<i>Аварийное</i>
14	+1	-1	+1	+1	-1	<i>Нестабильное</i>
15	-1	+1	+1	+1	-1	<i>Ест. разрушение</i>
16	+1	+1	+1	+1	-1	<i>Ест. разрушение</i>
17	-1	-1	-1	-1	+1	<i>Норм. эксплуатац.</i>
18	+1	-1	-1	-1	+1	<i>Норм. эксплуатац.</i>
19	-1	+1	-1	-1	+1	<i>Стабильное</i>
...

В результате обработки данных опросной матрицы по разработанной методике (глава 4) были получены коэффициенты разложения полинома.

В итоге осталось всего девять существенно отличающихся от нуля коэффициентов.

Результирующее полиномиальное выражение имеет вид

$$Y = 0,469 - 0,063 x_1 - 0,125 x_2 - 0,156 x_3 - 0,063 x_4 + 0,063 x_5 - 0,031 x_2 x_4 + 0,063 x_3 x_4 - 0,031 x_2 x_3 x_4. \quad (5.14)$$

Адекватность полинома (5.14) проводилась по F -критерию Фишера

$$F = \frac{S_y^2}{S_{ост}^2}, \quad (5.15)$$

где S_y^2 и $S_{ост}^2$ – дисперсия зависимой переменной и остаточная дисперсия соответственно;

$$S_y^2 = \sum_{i=1}^m \frac{(y_i - \bar{y})^2}{m - 1}, \quad (5.16)$$

\bar{y} – среднее арифметическое;

m – количество строк матрицы опроса;

$$S_{\text{ост}}^2 = \sum_{i=1}^m \frac{(y_i - y_{\text{расч}})^2}{m-p}, \quad (5.17)$$

$y_{\text{расч}}$ – расчетные значения по полиному (5.14);

p – число значимых коэффициентов полинома.

По исходным данным $F_{\text{расч}} = 988,2$.

Табличное значение критерия $F_{\text{табл}} = 1,98$. Поскольку $F_{\text{расч}} \gg F_{\text{табл}}$, то с доверительной вероятностью $P > 0,99$ полученное полиномиальное выражение (5.14) адекватно представляет знания эксперта при оценивании состояния СЛО. В таком случае полиномиальное выражение (5.14) следует считать математической моделью процесса изменения состояния дымовой трубы [27,224].

5.4.4 Анализ изменений состояния элемента дымовой трубы

Модель (5.14) отражает сложный нелинейный характер процесса изменения состояния дымовой трубы, поскольку отличными от нуля являются двойные, и даже тройные взаимодействия.

В качестве примера решения задач класса Γ (глава 1) рассмотрим визуализацию функции отклика модели (5.14) в трехмерном пространстве. Так, например, для изучения влияния переменных x_3 и x_4 в неблагоприятных условиях

$$x_1 = x_2 = x_5 = -1; x_3 = x_4 = +1$$

получено уравнение (5.18) поверхности отклика в трехмерном пространстве:

$$Y = 0,594 - 0,0156 x_3 - 0,031 x_4 + 0,032 x_3 x_4. \quad (5.18)$$

Для визуализации локальной модели (5.18) в программной среде [187] трехмерные поверхности отклика Y , как показано на рисунке 5.21, имеют явно выраженный минимаксный характер.

Не будем здесь анализировать поведение самой поверхности отклика, но вспомним, что она отражает логику принятия решения экспертом в таком важном деле, как оценка технического состояния дымовой трубы и на его основе – вывод об устойчивости и возможности дальнейшей эксплуатации объекта. При этом можно «видеть», как каждое сочетание значений переменных, выраженных

неколичественно или количественно, «отражается» в сознании эксперта точкой многомерного факторного пространства на поверхности отклика.

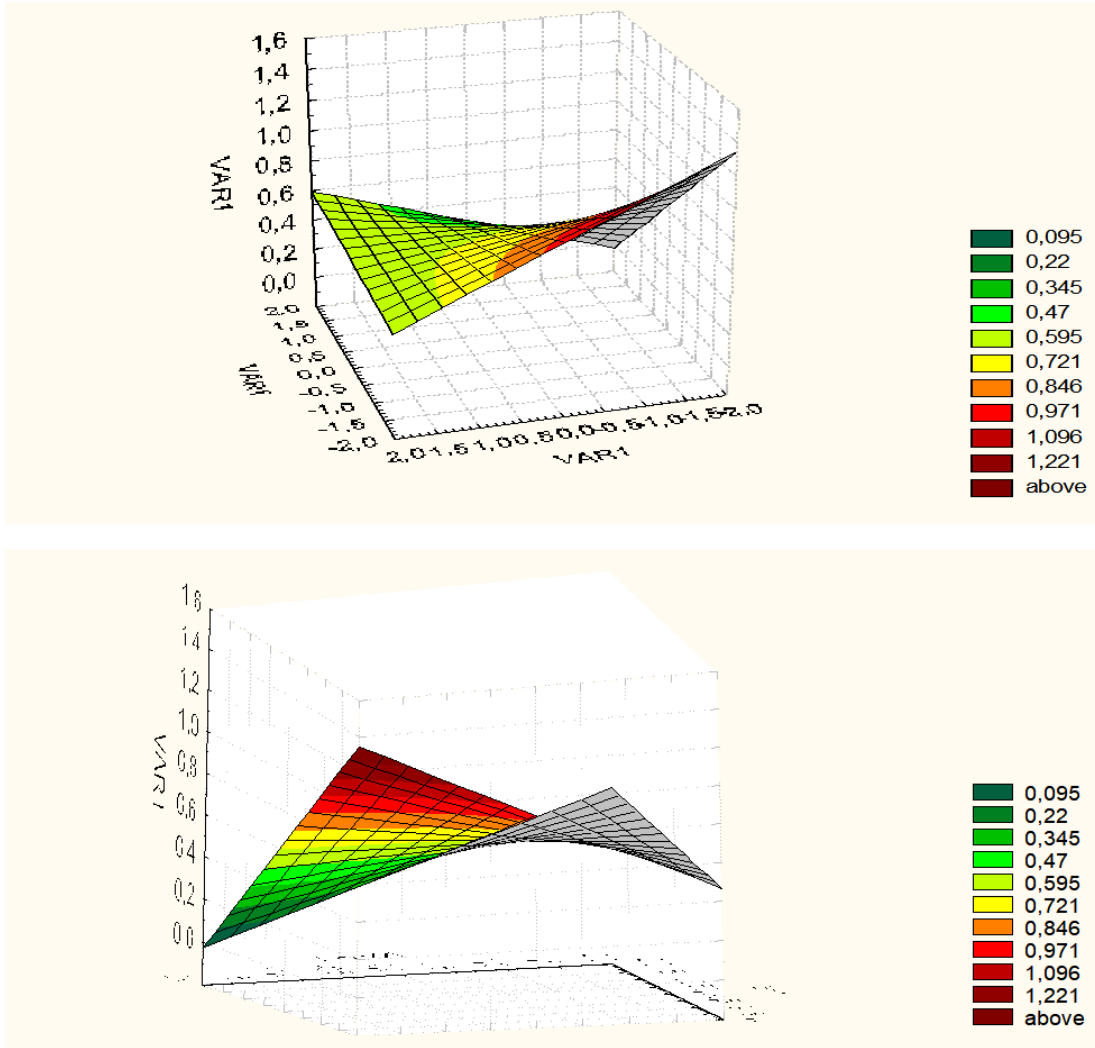


Рисунок 5.21 – Поверхность отклика изменения состояния элемента дымовой трубы по (5.18) в различных ракурсах как функция от факторов x_3 и x_4

Подчеркнем одну особенность визуализации логики принятия решения экспертом: явно видно, что достижение предаварийных ситуаций возможно при множестве сочетаний значений факторов. Так, при двух переменных, как видно из рисунка 5.21, это семейство линий, лежащих в различных областях сочетаний значений переменных. Экстраполируя аналогичные рассуждения на пространство, учитывающее более трех факторов, можно выделить многие закритические области, где объект находится на грани чрезвычайной ситуации. Разработанная

методика, таким образом, помогает «в автоматическом режиме» отслеживать и прогнозировать нежелательные ситуации, связанные с поведением объекта при различных наборах значений факторов, давая возможность своевременного принятия эффективных решений для предотвращения предаварийных ситуаций. Другими словами, представляется возможность *превентивного управления рисками чрезвычайных ситуаций* [27,101,102,118,,215,219,220,226,229].

Дополнительно по результатам дифференцирования уравнения (5.14) в частных производных возможно исследование форм и характера гиперповерхностей трехмерных диаграмм, построенных аналогично рисунку 5.21.

Результаты дифференцирования (5.14) по всем переменным представлены системой уравнений (5.19).

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial y}{\partial x_1} &= -0,063 \\ \frac{\partial y}{\partial x_2} &= -0,125 - 0,031x_4(1 + x_3) \\ \frac{\partial y}{\partial x_3} &= -0,156 + x_4(0,063 - 0,031x_2) \\ \frac{\partial y}{\partial x_4} &= -0,063(1 - x_3) - 0,031x_2(1 + x_3) \\ \frac{\partial y}{\partial x_5} &= 0,063 \end{aligned} \right\} \quad (5.19)$$

На рисунке 5.22 представлена поверхность отклика одного из уравнений (5.19).

Анализ результатов дифференцирования показывает сложный характер взаимосвязей между переменными, оказывающий влияние на скорость изменения Y .

Так, скорость изменения Y вдоль x_3 формируется переменными x_2 и x_4 . В переводе на инженерный язык это означает: величина скорости потерь с точки зрения эффективности использования дымовой трубы в зависимости от величины градиента расширения трещин не постоянна и сильно зависит от ширины трещин и градиента общего состояния объекта. Такое понятное с точки зрения практики

эксплуатации дымовых труб заключение в нашей интерпретации получает количественное определение и позволяет не только прогнозировать численные значения параметров, характеризующих техническое состояние трубы, но и глубже понять механизм макроразрушения данного объекта.

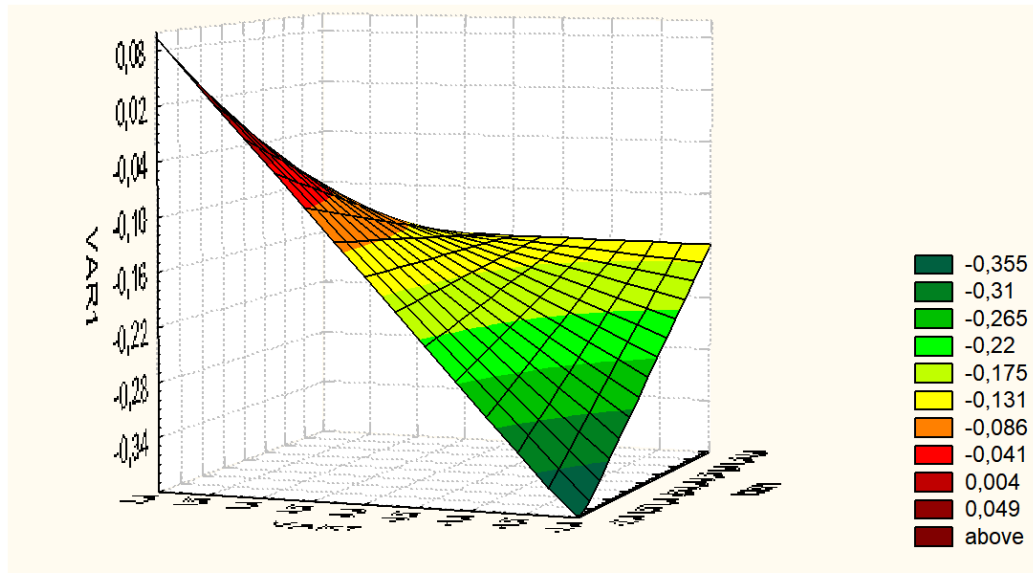


Рисунок 5.22 – Поверхность отклика скорости изменения Y вдоль переменной x_3

Гиперповерхности (5.19), как показано для одной из них вдоль переменной x_3 , отражают нелинейность динамики процессов изменения состояния СЛО при его эксплуатации в жестких средах.

Анализ (5.19) совместно с их функциями отклика указывает на наличие и проявление отрицательных обратных связей, которые изменяют параметры взаимодействий в соответствии с изменением состояния СЛО или его элементов. Так, возможно возрастание Y при увеличении x_3 связано с увеличением фактора x_4 , но также с уменьшением значений факторов x_2 и x_4 .

Полученные результаты позволяют выявить дополнительную новую информацию о характере совокупного влияния действующих факторов на изменения состояния СЛО и определить количественные границы действия факторов, превышение которых переводит дымовую трубу в предаварийное и даже в аварийное состояние.

5.4.5 Мониторинг и прогнозирование устойчивости объекта в целом

Полиномиальная модель (5.14) адекватно представляет техническое состояние элемента дымовой трубы. Ниже речь будет идти о состоянии всего пространственно-распределенного объекта в целом. Состояние СЛО естественным образом оказывает влияние на его устойчивость, однако отсутствие методик количественного описания существенно ограничивает качество исследований [27,219,232]. Разработанная выше методика позволяет рассматривать как расчетные значения элементов СЛО с единых позиций, так и в рамках единого подхода с получением модели оценивания состояния СЛО.

Объединение расчетных по (5.14) значений (рисунок 5.23) параметров трубы производится путем графического представления их функций отклика, распределенных по поверхности сооружения.

На рисунке 5.23 даны выборочные зависимости, характеризующие устойчивость ствола дымовой трубы по годам, как показано на рисунке 5.19.

На рисунке 5.23 по оси абсцисс расположена нормированная шкала оценки (рисунок 5.19), а по оси ординат – масштабированная развертка элементов дымовой трубы по высоте.

Высокое качество модели (5.14) демонстрирует скачок в состоянии трубы в сечении $R-R$ на отметке 145.0 м по периметру сопряжения массивов, выполненных из различных конструкционных материалов, что подтвердилось в результате реальных измерений на уровне данного сечения.

Представленные на рисунке 5.23 зависимости могут быть аппроксимированы линиями параболического типа вида $y^2=2px$.

Применительно к условиям представления графиков уравнение примет вид

$$(y/b - 1)^2 = 2p(a - x), \quad (5.20)$$

где (a,b) – координаты вершины параболы, p – ее параметр, которые можно определить по точкам соответствующих кривых.

В частности, на участке ствола дымовой трубы в отметках 21,0 - 145,0 м для 1996 года координаты вершины параболы находятся в точке $(0,84; 60)$, а $p = 1,9$.

Как следует из анализа поведения кривых, вершина параболы по высоте не мигрирует и составляет примерно треть от всей высоты трубы, чего нельзя сказать о двух других параметрах уравнения (5.20). Отметим только, что по величине изменения a и p можно строить прогнозирующие уравнения кривых и по ним осуществлять прогноз состояния всей трубы в целом.

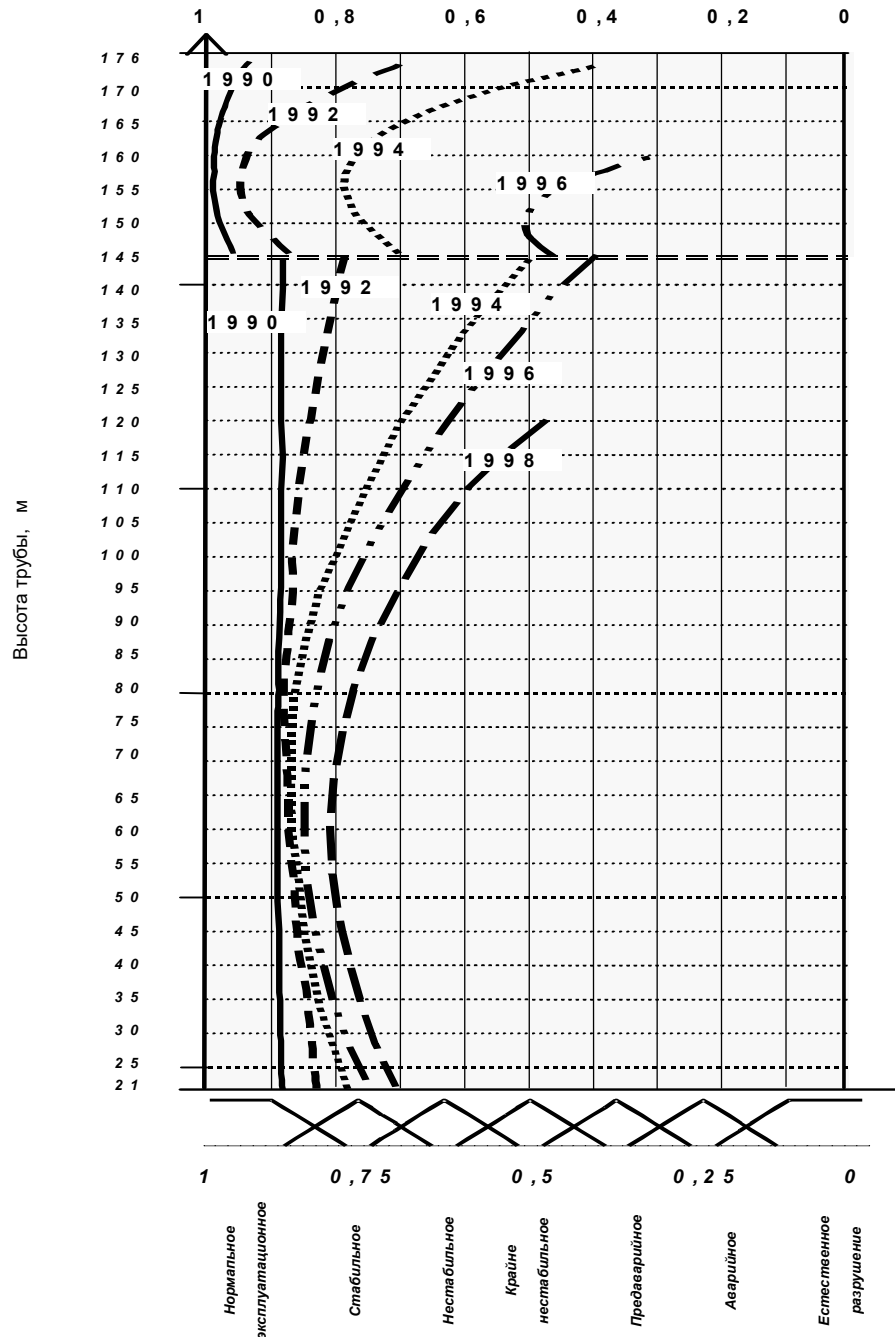


Рисунок 5.23 – Тренды распределения функций отклика в теле сооружения: числа у кривых – годы; R-R – область сопряжения массивов ствола, выполненных из различных конструкционных материалов

В качестве порогового значения принято состояние объекта между «крайне нестабильное» – «предаварийное», что соответствует количественному значению $Y_0 = 0,4$. При этом правильным инженерным решением является разборка верхней части ствола дымовой трубы до отметок 125,0-130,0 м, что позволило бы стабилизировать дальнейшее развитие негативных процессов внутри тела дымовой трубы и эксплуатировать объект с минимальным риском инициации нештатной ситуации в течение определенного временного интервала.

Однако принятое управленческое решение было иным и разборка была осуществлена только до отметки 169,3м. Тем не менее, даже частичное выполнение инженерного решения позволило повысить устойчивость объекта в целом и предотвратить его аварийное разрушение.

Оценочный прогноз, приведенный в таблице 5.14, в полной мере соответствует реальным изменениям технического состояния сооружения, что является убедительным свидетельством адекватности и высоких прогностических возможностях построенной модели.

Таким образом, на практике реализован принцип превентивного управления безопасностью исследуемого объекта. Достоверный прогноз позволил предупредить аварийное разрушение объекта, а выбор верного технического решения оптимизации его функциональных характеристик – продлить срок эксплуатации дымовой трубы.

В заключение проведем сравнение (таблица 5.14) экспресс-методов оценивания состояния пространственно-распределенного объекта и отметим преимущества полиномиальной модели [226,227,229] по сравнению с методом балльной оценки [75], суть которого заключается в следующем.

Таблица 5.14 – Прогнозные и фактические значения устойчивости объекта

Годы	Состояние объекта	Расчет модели	Прогноз на следующий год	Примечания
1990	Нормальное эксплуатационное	0,962	Стабильное	
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 горизонтальной трещины на отм.145.0м. Разрушение кладки оголовка.

Обобщением обширных статистических данных были выявлены характерные повреждения распределенных объектов, которые были формализованы в виде таблиц балльных оценок их технического состояния [75]. В зависимости от имеющихся повреждений состояние конструкций объектов разделены на пять категорий ([75], таблица 5.4). Оценки категорий состояния разработаны и табулированы для каждого типа СЛО, например, кирпичных дымовых труб ТЭЦ и др. Балльная оценка надежности проводится по максимальному повреждению в отдельных элементах, так как при его критическом значении разрушение всего обследуемого объекта наиболее вероятно.

Достоинством данного подхода является систематизация, ранжирование и присвоение относительного балла, во-первых, каждому типу повреждений или его внешнему проявлению, и, во-вторых, категоризация ТС объекта в целом. Это дает возможность по словесной шкале надежности перевести экспертные оценки в

условную надежность и вероятность (частоту) аварий в год, то есть уровню приемлемого технологического риска.

Применительно к рассмотренному выше пространственно-распределенному объекту проведена оценка его ТС по признакам силовых воздействий ([75], таблица 14): «Вертикальные трещины в кладке с шириной раскрытия более 5 мм. Разрыв стяжных колец» и по признакам воздействий внешней среды: «Разрушение оголовка и выпадение отдельных его звеньев и кирпичей. Кирпичная кладка выпучилась и покрыта трещинами» относится к категории 5, что по приводимой таблице дает относительную надежность 0,65 со всеми вытекающими заключениями: «Аварийное состояние. Существующие повреждения свидетельствуют о возможности обрушения конструкций. Требуется немедленная разгрузка конструкций и устройство временных креплений, стоек, подпорок, ограждений опасной зоны. Ремонт в основном проводится с заменой аварийных конструкций».

При этом оценка относится ко всему сооружению в целом без дифференциации по высоте объекта, которая имеет место при оценке по разработанной в диссертации методике. Следует указать также на недостатки балльной методики из-за классического статистического подхода.

Концептуально иная ситуация складывается при оценивании пространственно-распределенного объекта в конкретной ситуации по разработанной методике, когда эта же статистическая информация переработана с учетом опыта эксперта и реализована при построении полиномиальной модели (5.14). Все оценки и суждения, объединенные в сознании эксперта его профессиональным опытом, независимы от исходной статистической информации и формализованы в виде собственной модели принятия решений. При этом эксперт выступает как «интеллектуальная измерительно-диагностическая система» [239].

Проведенный анализ показывает, что методика оценки состояния СЛО по созданной модели более чувствительна по сравнению с балльной. Такой вывод вполне закономерен, поскольку концепция построения агрегированного (обобщенного) показателя состояния СЛО на множестве лингвистических

переменных позволяет учитывать не среднестатистические, а индивидуальные особенности сооружения и результаты эксплуатации не только отдельных его частей, но и всего объекта в целом.

Следовательно, адекватное прогнозирование с использованием математической модели нового класса – реальный и эффективный способ управления безопасностью предприятий и территориально-промышленных образований в целом.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5

1. В главе 5 диссертации изложены результаты экспериментальной апробации разработанного научно-методического обеспечения на основе построенных моделей однопараметрического оценивания СЛО в статических условиях. Также проведенные в главах 2-4 теоретические исследования представлены в виде схемы взаимосвязей методов и методик обеспечения задач классов А, Б, В и Г для решения проблемы синтеза нового класса моделей оценивания состояния СЛО на основе ЭЗ в условиях неопределенности. Изложены основные результаты экспериментальной апробации разработанного научно-методического обеспечения

2. Разработана методика оценивания степени развития дефектов при эксплуатации насосных агрегатов заправочного оборудования ракетно-космических комплексов. По построенной модели виброскорости как базы знаний строят графики ее изменения в зависимости от каждой из переменных, влияющих на состояние рассматриваемого СЛО, во всем диапазоне их изменения. Также фактически показано, что предложенное в диссертации решение обратной задачи по полученной модели методически оправдано.

3. На основе построенной синтезированной модели повреждаемости элементов конструкции и оборудования стартовых комплексов в условиях интенсивного теплового нагружения осуществлено прогнозирование величины суммарной длины трещин в газоотводе в зависимости от условий пуска РКН, которые описываются соответствующими параметрами в пятимерном пространстве лингвистических переменных. Результаты прогнозирования

указанной величины позволили обоснованно подойти к определению уровня ремонтно-восстановительных работ. При этом исследования показали, что точность прогнозирования в этом случае существенно выше, чем при применении обычного регрессионного анализа.

4. Разработаны методики оценивания технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса химических источников тока для энергоснабжения объектов наземной космической инфраструктуры (космодром «Плесецк»). Данные методики включают разработку показателей, позволивших на конструктивном уровне осуществить количественное оценивание изучаемого явления, информационно-методический аппарат, обеспечивающий получение принципиально новой информации о поведении объектов на протяжении всего периода их эксплуатации. Проведенные исследования позволили применить разработанную методику оценивания технического состояния объекта для задач неразрушающего контроля, а также на этой основе разработать новую методику прогнозирования остаточного ресурса, подтвержденную патентом РФ.

5. Созданы математическая модель и методика оценивания обобщенного состояния пространственно-распределенного объекта, состоящая в формализованном представлении и оценивании состояния отдельных его элементов с использованием конкретных функциональных зависимостей, отражающих особенности рассматриваемой предметной области и наглядно представленных в виде соответствующих программных интерфейсов. Расчеты с использованием полученной модели позволяют в оперативном режиме оценивать и принимать управленческие и инженерные решения об угрозе инициации критических событий.

ГЛАВА 6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ ПОСТРОЕНИИ МОДЕЛЕЙ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ В ДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

В данной главе приведены примеры проведенных теоретических исследований моделирования многопараметрического оценивания состояния СЛО для мониторинга и прогнозирования в условиях существенной неопределенности. При этом с целью недопущения выхода состояния СЛО или реализуемого технологического процесса за регламентируемые пределы динамика изменений состояния рассматриваемого объекта отслеживается в режиме реального времени. Попутно решаются методологические и методические вопросы, учитывающие специфику функционирования СЛО в состояниях, описываемых многомерными пространствами лингвистических переменных.

6.1 ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ НЕЧЕТКОГО ЛОГИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ПРОЦЕССОМ

6.1.1 Характеристика объекта

Процесс обжига сульфидного концентрата в печах кипящего слоя предназначен для перевода сульфидов в окислы металлов за счет протекания твердофазных реакций при продувке порошкообразного концентрата воздухом в кипящем (псевдокипящем, псевдооживленном) слое с выделением тепла за счет экзотермических реакций, достаточного для протекания процесса в автогенном режиме [77,79,105,107,216]. Рассматриваемый процесс, как и все процессы цветной металлургии, относится к СЛО.

Управление процессом осуществляет оператор в ручном режиме с использованием данных АСУ рассматриваемым технологическим процессом (ТП), в число которых входят значения переменных: скорость подачи концентрата, т/час; скорость подачи пыли, т/час; температура в реакционной зоне, °С; давление в рабочей камере, мм в ст. Управляющими переменными являются уставки скоростей подачи концентрата и пыли, т/час, а также отслеживаемый оператором-

технологом температурный режим протекания процесса обжига в реакционной зоне печи.

Поскольку процесс ведется в твердофазном состоянии, то превышение температуры свыше 1270°C приводит к аварийному состоянию псевдооживленного слоя из-за слипания расплавленных частиц. Поэтому при приближении температуры к критическому режиму оператор принимает решение либо о прекращении подачи концентрата, либо включает подачу пыли, либо прекращает подачу обоих материалов (процесс ставят «на прожарку»), отслеживая температуру в реакционной зоне до выхода из критической зоны.

Процесс осуществляется в условиях существенной неопределенности, что позволяет применить к нему рассматриваемый в диссертации подход.

6.1.2 Построение интеллектуализированной базы знаний для нечеткого логического регулятора

Исходное состояние: операторное управление по данным АСУ процессом обжига в печи кипящего слоя.

Требуется: создать модель нечеткого логического регулятора (НЛР) как базу знаний для автоматизации управления производственным процессом с целью увеличения производительности и предупреждения аварийных ситуаций.

Для создания базы знаний нечеткого логического регулятора (НЛР) было выбрано факторное пространство [77,79,213]:

X_1 – скорость подачи концентрата, т/час;

X_2 – скорость подачи пыли, т/час;

X_3 – температура в реакционной зоне, $^{\circ}\text{C}$;

X_4 – скорость изменения (градиент) температуры, $^{\circ}\text{C}/\text{мин}$;

X_5 – разброс величины давления в рабочей камере, мм водяного столбца;

X_6 – время отслеживания процесса от момента предыдущей выработки управляющих воздействий, мин;

Y_1 – уставка скорости подачи концентрата, т/час;

Y_2 – уставка скорости подачи пыли, т/час.

Поскольку переменные X_3 и X_6 играют определяющую роль в смысле принятия решения об изменении режима обжига, то были проведены дополнительные исследования инерционности процесса по статистическим данным [79].

Анализ поведения графиков автокорреляционных функций [51] показал, что корреляция удаленных друг от друга значений становится неразличимой на фоне ошибки своего определения при достижении интервала времени по загрузке примерно в 6-7 минут (рисунок 6.1).

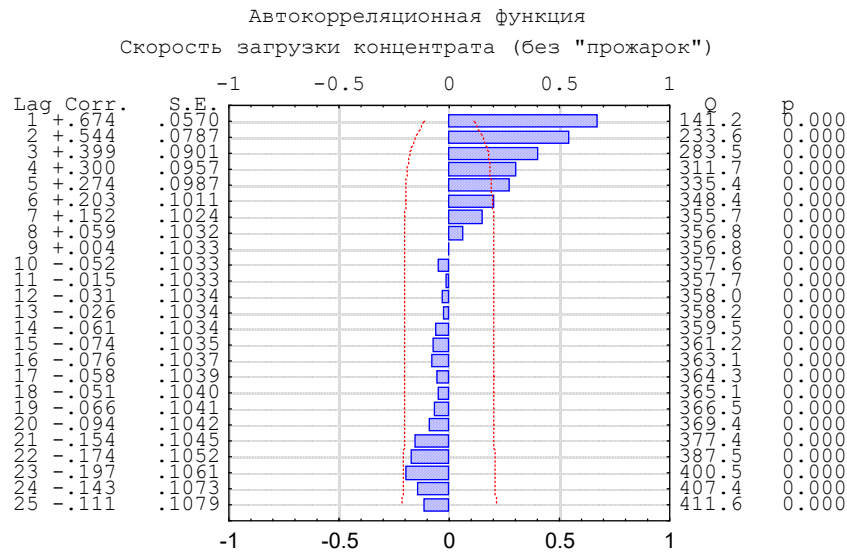


Рисунок 6.1 – Автокорреляционная функция скорости загрузки концентрата в печь кипящего слоя

Это значение соответствует пересечению показаний автокорреляционной функции с ошибкой ее определения, показанной на графике красной пунктирной линией. По температуре в кипящем слое такое определение составляет примерно 19 минут. Таким образом, система «помнит свое прошлое» в течение определенных интервалов времени. Иными словами, проведена оценка инерционности системы по основным управляющим переменным.

Разброс величины давления в рабочей камере X_5 (мм в. ст.) введен в факторном пространстве как индикатор, по величине которого определяют состояние чистоты распределительной решетки воздуха в рабочей камере. Так, наличие резких скачков давления свидетельствует об образовании на решетке

слипшихся комков материала, забивающих ячейки решетки, что является сигналом предаварийного состояния кипящего слоя в целом.

Факторное пространство, таким образом, системно описывает процесс принятия решения оператором-технологом.

После заполнения экспертом опросной матрицы полного факторного эксперимента типа 2^6 и проведения соответствующих вычислительных процедур, указанных в главе 4, построены модели для обеих выходных переменных [201,213,224]:

$$\begin{aligned}
 Y_1 = & 12,56 + 0,77x_1 + 1,31x_2 - 0,73x_1x_2 - 1,43x_6 - 1,15x_1x_6 - 2,1x_4 \\
 & + 1,83x_1x_4 - 1,24x_2x_4 - 1,19x_1x_2x_4 - 0,53x_2x_4x_6 - 0,95x_3 + 1,12x_1x_3 \\
 & - 1,72x_2x_3 - 0,72x_1x_2x_3 - 1,63x_2x_3x_6 - 1,22x_3x_4 - 1,23x_3x_4x_6 - 0,75x_2x_5 \\
 & + 0,56x_5x_6 - 0,55x_1x_5x_6 - 0,9x_3x_5;
 \end{aligned} \tag{6.1}$$

$$Y_2 = 4,8 + 1,4x_2 - 0,55x_6 - 0,52x_1x_2x_4 - 0,58x_1x_2x_3 - 0,55x_2x_3x_6, \tag{6.2}$$

где переменные представлены в кодированном (стандартизованном) виде по формулам:

$$\begin{aligned}
 x_1 = (X_1 - 10)/5; \quad x_2 = (X_2 - 5)/2; \quad x_3 = (X_3 - 1050)/60; \\
 x_4 = (X_4 - 0)/1,5; \quad x_5 = (X_5 - 1,5)/0,5; \quad x_6 = (X_6 - 37,5)/12,5.
 \end{aligned}$$

В полиномах (6.1) – (6.2) приведены только значимые коэффициенты. Ошибка при уровне значимости 0.05 составила $s\{b_i\} = 0.51$.

Оценка адекватности уравнений (6.1) – (6.2) проверялась двумя независимыми друг от друга способами.

Первый способ заключался в предъявлении оператору-технологу результатов, рассчитанных по полиномам. Эксперт согласился со всеми сгенерированными производственными правилами, признавая при этом допустимость всех расчетных значений кроме двух случаев, когда он действовал бы иначе.

Второй способ – проверка адекватности расчетов по управляющей модели (6.1) – (6.2) на данных оперативного контроля процесса в течение 400 мин с уровнем квантования одна минута. Сравнение расчетных по модели и фактических значений иллюстрируется рисунком 6.2.

Как следует из анализа рисунка 6.2, расчетные значения хорошо отслеживают логику оператора как относительно реакции на подъем температуры в реакционной зоне, так и ведения процесса в целом.

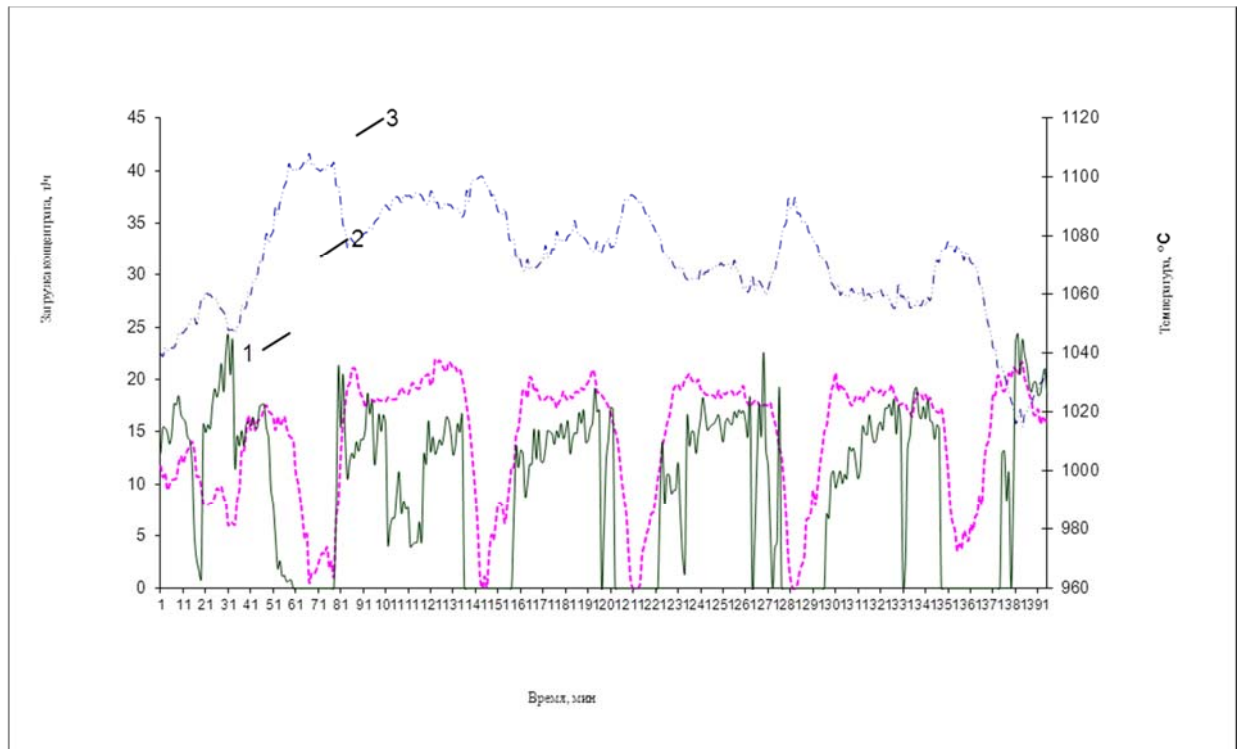


Рисунок 6.2 – Изменение загрузки концентрата в печь кипящего слоя по времени: 1 – фактическая; 2 – расчетная по (6.1); 3 – изменение температуры в реакционной зоне

Коэффициент корреляции между расчетными по (6.1) и фактическими значениями ведения процесса рядовым оператором получился равным $R = 0.56$. Таким образом, можно утверждать с высокой вероятностью, что расчеты адекватны значениям на практике ведения процесса. Однако такое значение коэффициента корреляции свидетельствует и о том, что ведение процесса обжига на основе закономерностей заданных в виде (6.1) – (6.2), отражающих знания и опыт принятия решений лучшим обжигальщиком, более функционально в смысле производительности агрегата в целом.

На основании полученных оценок можно считать (6.1) – (6.2) моделями, позволяющими принимать адекватные решения по ведению процесса.

Полиномиальные модели (6.1) – (6.2) были использованы как база знаний для нечеткого логического регулятора при автоматическом управлении печью кипящего слоя. В пользу такого использования свидетельствует прогнозирование приближения процесса к предаварийным ситуациям в автоматическом режиме [105,213,216]. Так, например, на рисунке 6.3 линия АВ на поверхности отклика модели управления обжигом в кипящем слое никелевого концентрата наглядно выделяет аварийные области, где ведение процесса невозможно.

Далее описана одна из возможных архитектур информационной интеллектуализированной системы автоматического управления (САУ), сформированной с помощью объектно-ориентированного подхода к синтезу моделей обработки данных.

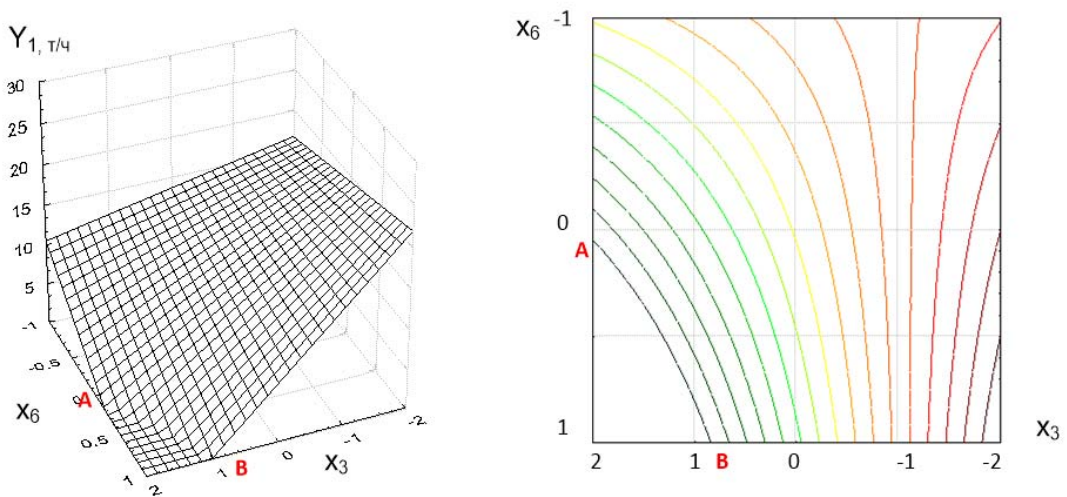


Рисунок 6.3 – Объемный и плоскостной портреты функции отклика

Y_1 – скорость загрузки концентрата в печь кипящего слоя как функция температуры (x_3) и времени предыстории (x_6). Факторы x_1, x_2, x_4, x_5 равны +1.

$$Y_1 = 10,46 - 4,39x_3 - 3,1x_6 - 2,85x_3x_6. \quad (6.3)$$

В качестве примера применения рассмотрена информационная модель базы знаний нечеткого логического регулятора для интеллектуализированной САУ управления обжигом никелевого концентрата в печи кипящего слоя [237].

6.1.3 Обобщенная структура интеллектуальной САУ

На рисунке 6.4. представлена обобщенная структура интеллектуальной САУ для управления сложным многофакторным процессом [107], в частности процессом обжига сульфидного никелевого концентрата в печи кипящего слоя [79], в которой в качестве базы знаний нечеткого логического регулятора [213, 230, 231,237] выступают построенные модели (6.1) и (6.2).

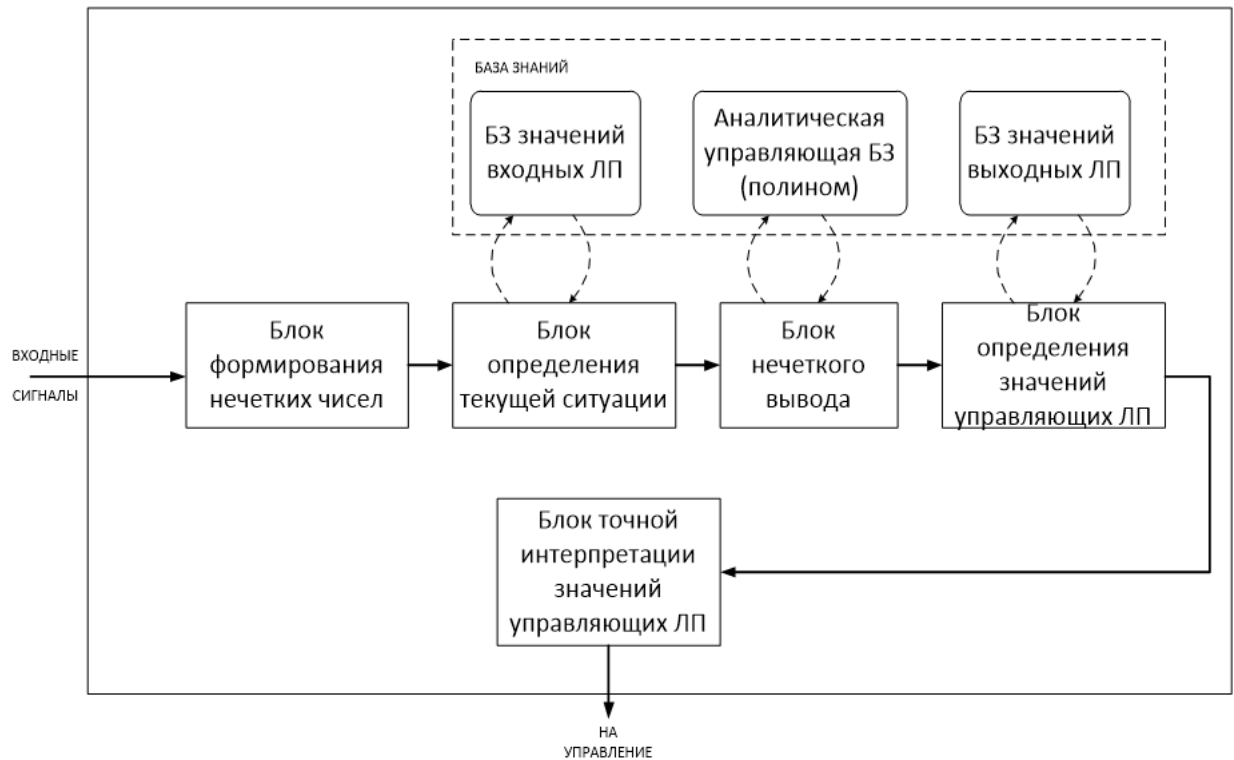


Схема управления на базе нечеткого логического регулятора

Рисунок 6.4 – Схема управления на базе нечеткого логического регулятора

На рисунке 6.5 представлена объектно-ориентированная модель [230,231,237] обработки числовой информации внутри нечеткого логического регулятора, которая, в свою очередь, может служить основой для его реализации в виде программного модуля.

Данная структурная схема содержит все выделенные «объекты» разработанной интеллектуальной системы управления процессом обжига сульфидного никелевого концентрата и систематические «связи» между ними.

Мгновенные значения входных технологических параметров поступают в объект «МАССИВ», где формируется ограниченный массив данных текущего отрезка времени для дальнейшей обработки.

Создание экземпляров объектов данного типа происходит периодически по сигналу таймера (на схеме не указан) для каждого контролируемого параметра. После первичной обработки экземпляры объекта «МАССИВ» «порождают» экземпляры объекта «FUZZY», на выходе которого получаем стандартизованное нечеткое число (LR)-типа.

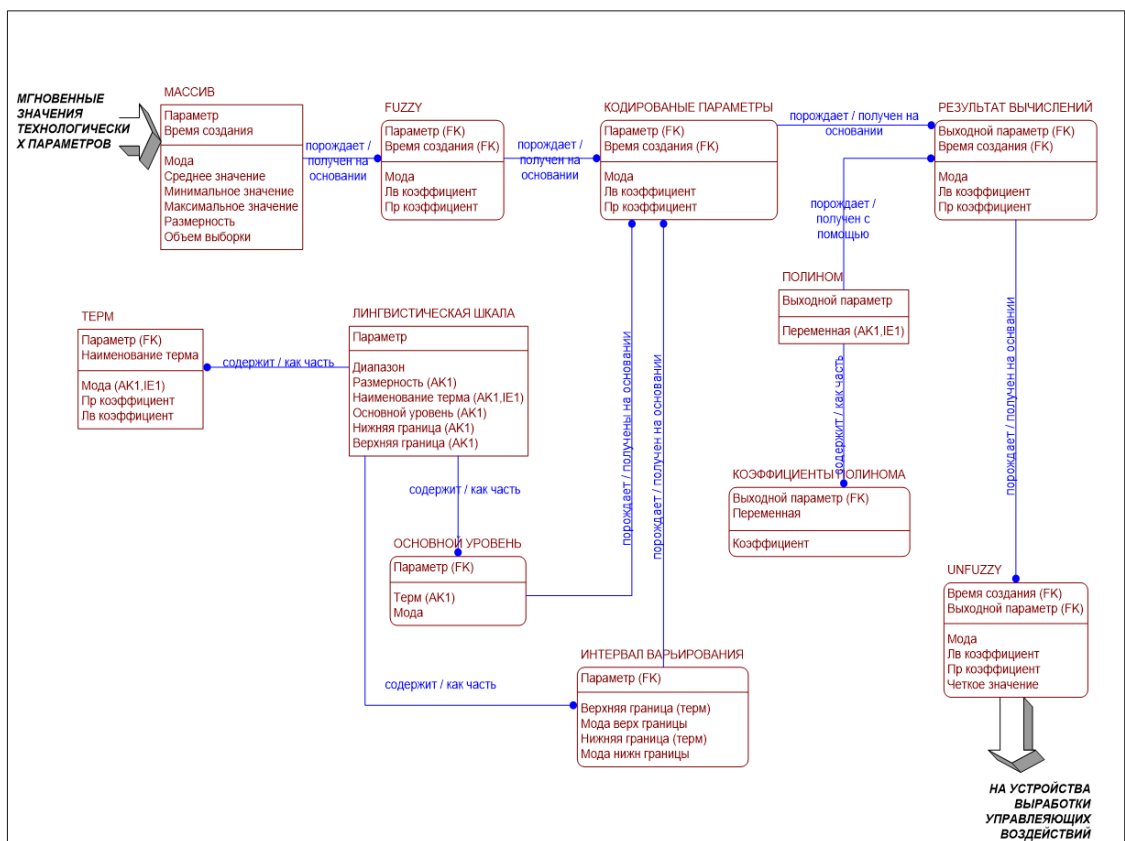


Рисунок 6.5 – Объектно-ориентированная модель механизма обработки числовой информации внутри нечеткого логического регулятора

Это происходит следующим образом. Система обрабатывает экземпляры объекта «МАССИВ», а именно: по текущей выборке данных, строится гистограмма, количество интервалов разбиения которой определяется по формуле

$$K = 1 + 3,32 \lg N,$$

где K - количество интервалов разбиения; N - объем выборки.

Затем проводит поиск минимального и максимального значения, определяется мода выборки.

Полученный на основании объекта «FUZZY» объект «КОДИРОВАННЫЕ ПАРАМЕТРЫ» решает задачу перехода от абсолютных величин, каковыми являются нечеткие числа на его входе, к относительной, ранжированной в диапазоне $[-1; +1]$

Для этого привлекаются также объекты «ИНТЕРВАЛ ВАРЬИРОВАНИЯ» и «ОСНОВНОЙ УРОВЕНЬ». Назначение и способы взаимодействия между этими тремя объектами соответствуют традиционным методикам планирования эксперимента [7,151]. В свою очередь, эти объекты, а также объект «ТЕРМ», являются составной частью объекта «ЛИНГВИСТИЧЕСКАЯ ШКАЛА».

Объект «РЕЗУЛЬТАТ ВЫЧИСЛЕНИЙ» включает в себя реализацию расчета управляющих воздействий по полиномиальной модели и появляется в результате математических операций над экземплярами объектов «КОДИРОВАННЫЕ ПАРАМЕТРЫ», «ПОЛИНОМ».

Объект «ПОЛИНОМ» содержит информацию о входящих в состав полиномиальной модели переменных, используя, соответственно, экземпляры объекта «КОЭФФИЦИЕНТЫ ПОЛИНОМА».

После расчета величин управляющих воздействий их необходимо привести к традиционной четкой форме. Это осуществляется с помощью объекта «UNFUZZY».

Наиболее чувствительной при управлении процессом обжига никелевого концентрата в печи кипящего слоя является температура в реакционной зоне. Поэтому весь диапазон температуры (X_3) разделен на ряд областей и в зависимости от того, в какой области находится основной параметр, производят изменение загрузки сыпучих материалов по полиномам (6.1) и (6.2). Например, при $T \in (1130-1150)^\circ\text{C}$ и $\text{grad}T > 0$, $T \in (1150-1200)^\circ\text{C}$ и $\text{grad}T$ любой, процесс относят к области предаварийного состояния \square и при времени нахождения в такой ситуации 6-8 мин прекращают автоматическое управление загрузкой сыпучих материалов,

информацию о текущих параметрах обжига отображают на мониторе оператора, а процесс ведут с повышением скорости подачи пыли до входа его в нормальную зону температур.

На основе анализа закона управления (см. рис. 6.2), сформированного с использованием можно сделать вывод о том, что ведение процесса по предлагаемому способу обладает рядом преимуществ:

а) обеспечивается более плавное, без резких скачков, ведение процесса в промежутках между периодами нулевых загрузок, например, между 100 и 150 минутами;

б) суммарный прирост производительности составляет около 30% по весу, что видно по интегральным площадям под соответствующими кривыми.

Кроме того, действия оператора по установлению скоростей загрузки в интервале времени 272-295 мин абсолютно неправомерны (прекращена загрузка в течение примерно 25 мин), что и показал автоматический способ управления (время прекращения загрузки практически стремится к нулю).

Приведенные примеры применения автоматического управления процессом обжига никелевого концентрата в кипящем слое убеждают в его эффективности как по плавности ведения, так и по производительности. Прогностическая точность вырабатываемого управляющего воздействия составляет 8%.

Таким образом, в данном исследовании представлено одно из возможных архитектурных решений информационного моделирования интеллектуальной системы автоматического управления на основе нечеткого логического регулятора с базой знаний в виде полиномиальных моделей, построенных на основе явных и неявных экспертных знаний. Для создания предложенной архитектуры был использован объектно-ориентированный подход к моделированию информационной системы. Эффективность предложенного подхода к моделированию нечеткого логического регулятора обусловлена широким распространением методик объектно-ориентированного представления мира в информационно-технологической индустрии, а эффективность работы алгоритмических решений интеллектуализированных систем автоматического

управления с ядром в виде моделей (6.1)-(6.2) – многочисленными предыдущими исследованиями [230,231,237].

По результатам исследования получен патент РФ № 2204616 от 20.05.2003 [200].

6.2 СИНТЕЗ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

6.2.1 Постановка задачи и путей ее решения

Проблемы управления для подавляющего большинства технологических процессов в различных отраслях промышленности (химическая, черная и цветная металлургия, горное и нефтегазовое производство, тепло-электроэнергетика, сельское хозяйство и др.) актуальны всегда, поскольку нет возможности предложить формальные модели управления такими процессами в силу их сложности и многопараметричности. Основным фактором, дезавуирующим любые попытки формализации математических моделей управления и оценивания состояния СЛО детерминированными методами, является «существенная неопределенность» входной информации [1,11-16,22,23,42-44,223]. Это проявляется в объективной невозможности стабилизировать и даже измерять значения ряда ключевых параметров состояния СЛО. Следствием такого положения является невозможность удержания основных переменных на необходимом уровне длительное время, что приводит к технологической рассогласованности процесса и отрицательно влияет как на качество конечных продуктов, так и на стабильность функционирования различных процессов в целом [8,9,27,104,175,176,178,230]. На языке математики такие процессы относят к «сложным техническим системам» или к «слабоструктурированным системам», для которых в главах 2-4 разработаны новая концепция и методика моделирования принятия решений об их состоянии.

Традиционная АСУ технологическим процессом (АСУТП) ставит своей задачей автоматизацию обслуживания агрегата или целого технологического передела, и в ее функции, по определению, не входят вопросы управления и

анализа состояния самих процессов. Таким образом, в случае наличия только базовой автоматизации в виде АСУ ТП оператор должен выполнять функции обслуживания не только агрегата, но и протекающего в нем процесса, т.е. выступать в качестве интеллектуальной информационно-измерительной системы. Именно это и приводит к проблеме «человеческого фактора», поскольку оператору не всегда удастся полностью достичь всех, чаще всего разнонаправленных, целей управления. Кроме того, конструктивные особенности агрегата не всегда позволяют в полной мере решать все вопросы на уровне АСУ ТП. Примером тому может служить проблема обеспечения требуемого уровня достоверности входной информации при оценивании качества и количества подаваемых материалов в режиме реального времени [2, 101,102, 151,152,202,229,241].

Существующие так называемые «коробочные решения» «под ключ» предполагают необходимость полной автоматизации агрегата или передела «с нуля», поставляя при этом как аппаратную составляющую автоматизации, так и программное обеспечение. Функциональность данного решения может быть достаточно широкой, в том числе и содержащей элементы интеллектуализации АСУ, но при этом совершенно несовместимой с существующими в настоящий момент автоматизированными системами потенциального заказчика, что зачастую приводит к финансовым затруднениям [67,160].

Ниже изложено применение теоретических разработок, выполненных в данной диссертационной работе, применительно к решению задачи построения интеллектуальной АСУ печи Ванюкова (ИАСУ ПВ). В печи (рисунок 6.6) реализуется процесс Ванюкова по переработке сульфидного медно-никелевого сырья на Медном заводе Заполярного филиала ОАО «Горно-Металлургической Компании «Норильский Никель» (г. Норильск). ИАСУ ПВ плавильного агрегата разработана на основе применения методологии, изложенной в главах 2-4 и реализованной в виде программного продукта [189,190,256] на базе платформы G2 фирмы Gensym (США).

Предлагаемый ниже вариант построения ИАСУ ПВ, используя базовую автоматизацию, предназначен для выработки решений, мониторинга и управления

процессом, протекающим в плавильном агрегате большой единичной мощности. Такая система в условиях «существенной неопределенности» способна оценивать неизмеряемые или плохо измеряемые параметры, давать их достаточно точную количественную интерпретацию, отслеживать задачу удержания технологической согласованности процесса и, как следствие, помогать оператору-технологу принимать правильные, в том числе и в количественном отношении, управляющие решения для выполнения всех поставленных целей [250-254].

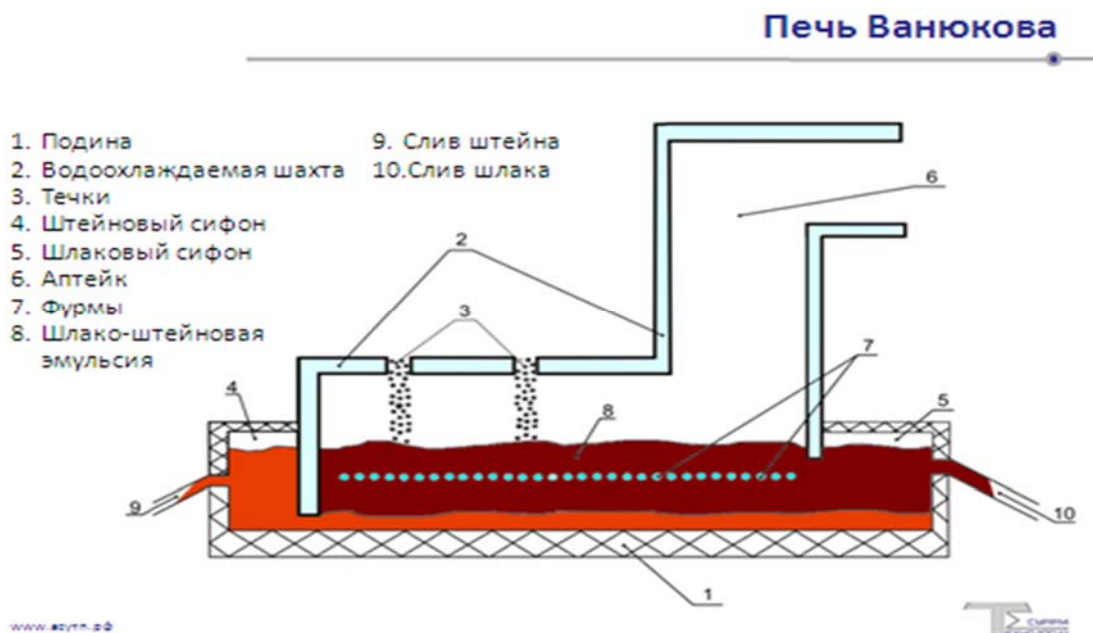


Рисунок 6.6 – Схема печи Ванюкова для реализации процесса Ванюкова

ИАСУ в данной версии, используя уникальные интеллектуальные технологии, изложенные в главах 2-4, должна:

- осуществить интеграцию с любой базовой АСУ, уже существующей на агрегате или переделе;
- реализовать создание общего информационного пространства для всех агрегатов передела с целью реализации общего управления и мониторинга;
- выполнить количественную оценку неизмеряемых и/или неколичественных параметров на каждом агрегате в рамках базовой АСУ каждого агрегата;

- выработать критерии технологической согласованности и связности как по каждому отдельно взятому агрегату, так и (при необходимости) по переделу в целом;

- дать оценку текущего состояния технологического процесса как по каждому отдельно взятому агрегату, так и по переделу в целом в режиме реального времени;

- выработать управляющие решения – советы оператору относительно восстановления технологического баланса как по агрегату, так и по плавильному переделу в целом.

Основу интеллектуального ядра созданной ИАСУ составляет метод, изложенный в главах 2-4 метод, суть которого можно выразить по А.С. Нариньяни [152-155] как «Полиномиальное преобразование НЕ-факторов», и метод представления знаний «Семантическая сеть на базовой онтологии» [251]. За счет комбинирования этих методов удалось синтезировать сложную многофакторную модель управления состоянием СЛО в виде семантической сети на специфичном ограниченном словаре.

Проведенные исследованиями по построению ИАСУ ПВ показали, что степень согласованности всех материальных и информационных потоков функционирования процесса возможно осуществлять только на основе *полимодельного подхода* [103,112,166-169,184-186,210-211,252-254].

В основу управления процессами, реализуемыми в ПВ, положена *парадигма организации формирования опережающей (проактивной) информации, с помощью которой в АСУ ПВ происходит обнаружение и прогнозирование причин возможного перехода рассматриваемого СЛО из работоспособного состояния в неработоспособное*. При этом в режиме реального времени предлагаемая АСУ ПВ выявляет конфликты непосредственно на стадии их зарождения, что дает возможность оператору своевременно принимать одно из допустимых управляющих воздействий, компенсирующих возникающие аварийные ситуации [236].

Применительно к рассматриваемой задаче следует обратить внимание на одно важное обстоятельство, которое учитывалось при извлечении и

формализации экспертных знаний в ходе синтеза модели оценивания состояния ПВ, а именно - при построении показателя «степени согласованности» процесса эксперт ввел в его факторное пространство вместе с параметрами, характеризующими загрузку шихтовых материалов также параметры дутья, параметры, характеризующие качество конечной продукции, а также тепловой режим, связав естественным образом степень взаимообусловленности ранее разомкнутых контуров управления загрузки и подачи дутья в рамках единой интегральной модели, которая и стала базой знаний для интеллектуализации существующей АСУ ТП.

Знания и опыт эксперта, как показывает практика управления ПВ, в явном виде «сшивают» многомерное факторное пространство, формируя в своем сознании поверхность отклика, на основе которой рассматриваемый технологический процесс будет реагировать своими измеряемыми и неизменяемыми параметрами на управляющие воздействия оператора-технолога. В предлагаемой ИАСУ ПВ при разработке комплекс программ и формирования соответствующих данных использовались как принятые в металлургической практике расчетные формулы, так и осуществлялось генерирование значений недостающих неизменяемых и вычисляемых параметров по синтезированным моделям [252,254,256].

6.2.2 Процесс Ванюкова как объект управления

Исходное состояние: ручное операторное управление процессом плавки (рисунок 26) в печи Ванюкова (ПВ) по данным АСУ ТП (Медный завод, «ГМК «Норильский никель»).

Требуется: создать интеллектуальную автоматизированную систему управления (ИАСУ ПВ) условиях существенной неопределенности на основе явных и неявных экспертных знаний.

Производительность процесса Ванюкова по переработке шихты достигает 160-180 т/час, по расходу кислорода – до 30 000 м³ /час. Подача различных

шихтовых материалов осуществляется из восьми бункеров ленточными питателями на сборные конвейеры. Конечными продуктами процесса являются штейн и отвальный шлак с заданными производственными показателями по содержанию меди, а также отходящие газы с высоким содержанием SO_2 .

До создания ИАСУ ПВ агрегат был автоматизирован, а управление процессом плавки осуществлялось с АРМ оператора («пульта»). При этом использовались не только показания датчиков от исполнительных механизмов, но и органолептическая информация (вербальная, неколичественная, нечеткая), которую плавильщик, наблюдая характерные особенности поведения ванны расплава (яркость свечения расплава, величину и «тяжесть» брызг и др.), передает на пульт оператору по громкой или телефонной связи. Все эти разнородные по своей физической сути источники информации в совокупности позволяют оператору оценивать сложившуюся ситуацию по многим переменным, например «Загрузка», «Высота ванны», «Температура расплава» и другим, которые обуславливают более обобщенные понятия – «Состояние ванны расплава», «Состояние процесса в целом» [250-254].

Однако объективно возникающие требования к процессу, например, проплав большого количества «нештатного» техногенного сырья, нарушают технологическую согласованность процесса. Вследствие этого оператор не всегда принимает верные решения и «теряет» либо температуру, либо качество конечных продуктов.

При построении ИАСУ использованы 11 построенных на знаниях моделей только физико-химических превращений шихтовых материалов в ванне расплава, объединенных в семантическую сеть на базовой онтологии [251]. В комплекте моделей задействованы переменные как получаемых непосредственно от первичных датчиков через АСУ ТП, так и вычисляемых по различному виду моделям в силу объективной невозможности их приборного определения в принципе. Синтезированный таким образом виртуальный СЛО в виде программного продукта [254,256], работая параллельно с технологическим процессом, показал хорошую степень согласованности расчетных и практических

выходных данных по целому ряду конечных продуктов и внедрен в промышленное производство на Медном заводе Заполярного Филиала «Горно-Металлургической Компании «Норильский Никель» [160,161].

6.2.3 Методология управления процессом Ванюкова на основе «принципа разрешения конфликтов»

В основу разработанной ИАСУ ПВ положен принцип ведения процесса в достаточно узком «коридоре» по главным критериям технологической согласованности процесса для улучшения качества конечной продукции и сохранению эксплуатационных свойств агрегата. ИАСУ ПВ предназначена для прогнозирования нарушений технологической согласованности на начальных стадиях их зарождения путем анализа разработанных на базе экспертных знаний специальных критериев и соответствующих критериальных функций [107,132,241,244,248,252]. Критерии и критериальные функции позволяют в конструктивном виде задать цели управления процессом и информируют оператора о текущем состоянии процесса. При этом выход значений критериальных функций за допустимые границы интерпретируются системой как начало «конфликта», а для оператора являются сигналом необходимости принятия рекомендуемых управляющих воздействий для возврата процесса в состояние технологической согласованности. Такой подход позволяет заблаговременно информировать оператора о возможном развитии критических ситуаций в самом начале возникновения технологического дисбаланса и принимать соответствующие меры для предупреждения их дальнейшего развития.

Как показывает практика ведения процесса, множество фактически встречающихся режимов гораздо шире «области согласованности» (рисунок 6.7).

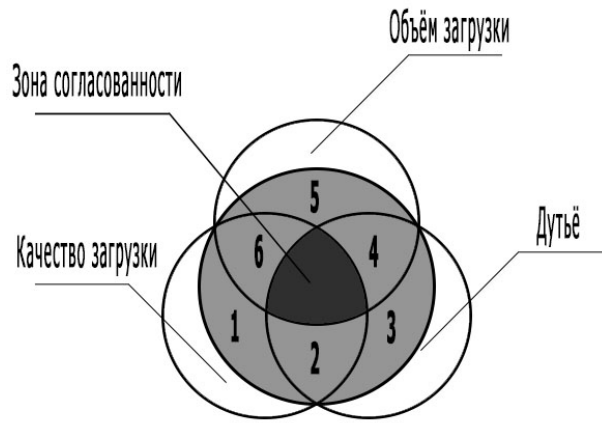


Рисунок 6.7 – К интерпретации «конфликтов»

При этом, находясь в различных зонах фактических режимов вне «области согласованности», процесс «испытывает» постоянные «конфликты» при стремлении достичь этой зоны:

К1 – переокисление металлосодержащих;

К2 – недоокисление металлосодержащих;

К3 – избыток флюсов;

К4 – недостаток флюсов;

К5 – горячий ход печи;

К6 – холодный ход печи;

К7 – невозможность прямого определения температуры расплава в реакционной зоне печи;

К8 – невозможность прямого определения физического объема поступающей шихты.

Так, в зоне 1, где пересекаются области допустимых загрузок и качества шихты, конфликт может выражать избыток или недостаток флюса по отношению к металлосодержащим способны и вызвать конфликты К1-К4; в зоне 2 – низкое качество шихты по металлосодержащим – К2, К4; в зоне 3 – неблагоприятные сочетания качества загрузки с нехваткой кислорода и избытком подачи природного газа – К2, К6; в зоне 4 – недостаток или избыток дутья – К5-К6; в зоне 5 – горячий

или холодный ход печи – К1-К2; в зоне 6 – недостаток или избыток загрузки шихты – К1, К2, К5, К6.

Парадигма заключается в выявлении «конфликтов», то есть состояний процесса ПВ за границами «области согласованности», но в пределах «области фактических режимов», по какому-либо из параметров, и поиск по моделям нескольких вариантов движения процесса к «области согласованности».

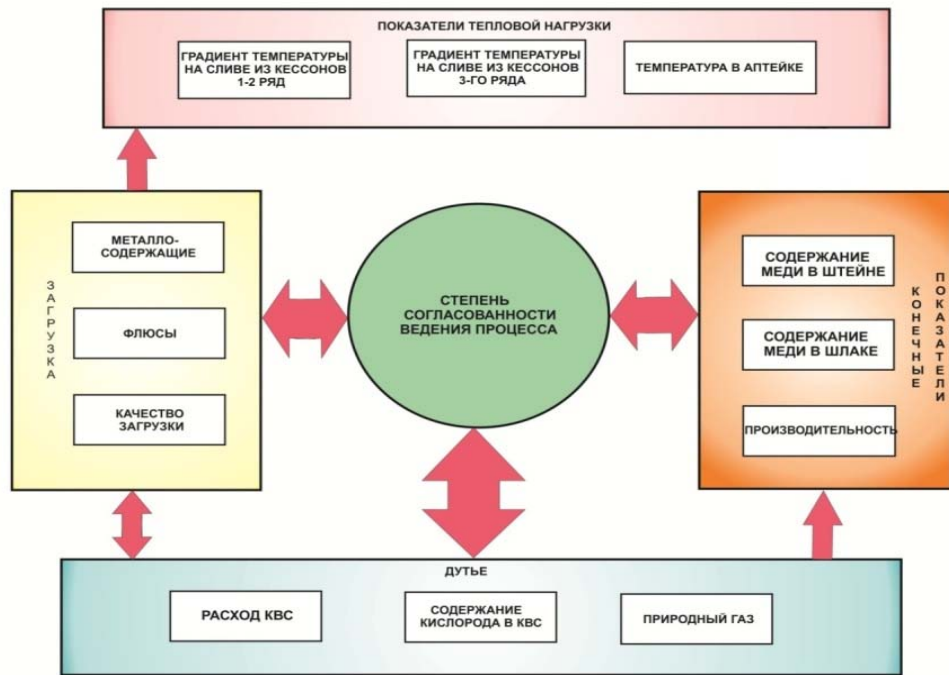
«Степень согласованности» в новой парадигме, таким образом, выступает переменной, численные значения которой способны в реальном масштабе времени указывать на наличие конфликта и его идентификацию, а также характеризовать качество работы процесса в целом.

6.2.4 Синтез ИАСУ ПВ

Особенностью построения моделей оценивания состояния СЛО по разработанной в главе 4 методике и алгоритму, представленному на рисунке 4.2, является использование опыта и знаний высококвалифицированного эксперта (группы экспертов). При этом знания эксперта как бы «сшивают» многомерное факторное пространство из нечетких лингвистических переменных, создавая структуру моделей, по которым процесс будет реагировать на управляющие воздействия оператора-технолога с визуализацией его действий по основным параметрам на пульте в режиме реального времени [250,252].

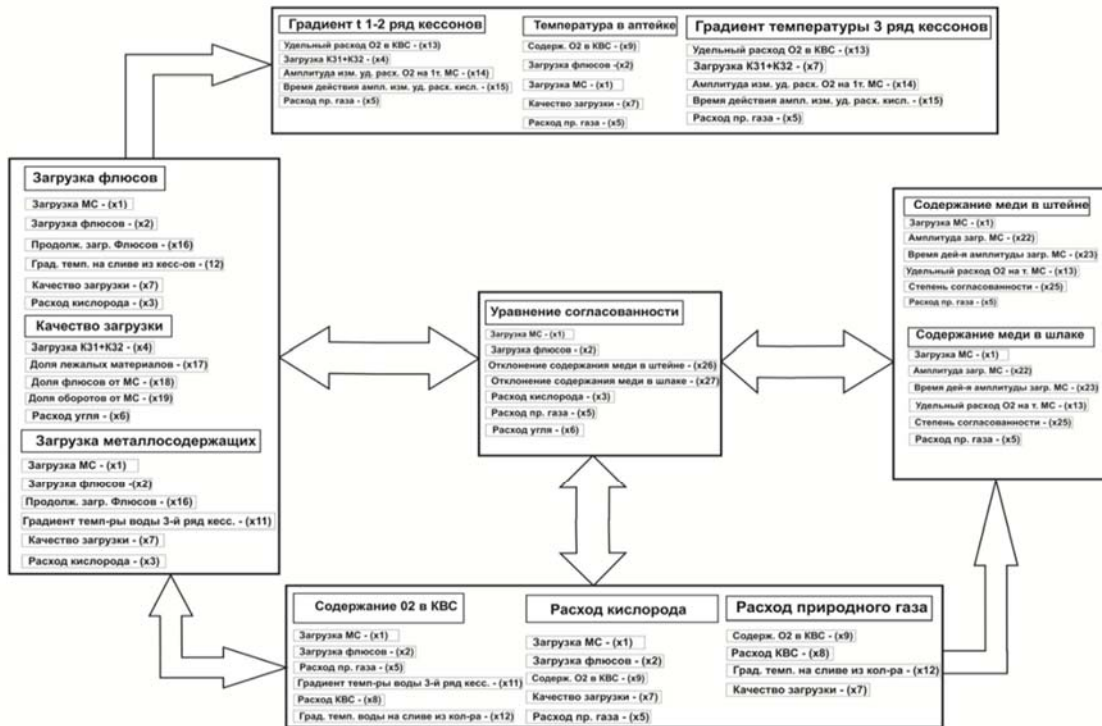
Поскольку состояние промышленного объекта описывается сотнями переменных и дополнительно снимаются тысячи показаний от первичных приборов, то при синтезе ИАСУ ПВ потребовалось создание модели «виртуальной печи» со всеми обслуживающими переделами и механизмами, вплоть до положения заслонок для измерения расходов в трактах подачи кислорода, воздуха или природного газа.

Общая схема управления рассматриваемым технологическим процессом показана на рисунке 6.8.



а)

Состав расчетных моделей



б)

Рисунок 6.8 – Схема модели управления ПВ по степени согласованности процесса в целом: а – общая схема; б – состав расчетных моделей

Она связывает основные физические и информационные потоки, обеспечивающие реализацию данного процесса, обеспечение выполнения производственных заданий и «жизнедеятельность» агрегата в целом.

ИАСУ ПВ на основании исходной информации, получаемой из АСУ ПВ и других информационных систем, реализует в режиме реального времени расчеты текущего состояния процесса, анализирует наличие технологического дисбаланса и в случае идентификации конфликтных ситуаций сообщает о них оператору с предложением сценария разрешения конфликта.

Система выступает, таким образом, в роли «советчика оператору» и визуализирует информационные каналы, которые отображают для пользователя критерии степени сбалансированности технологического процесса.

Степень согласованности процесса по фактическим значениям загрузки и дутьевых режимов с заданным содержанием меди в штейне рассчитывается по полиномиальной модели (6.4):

$$\begin{aligned}
 Y_1 = & 0,4383 - 0,0352x_1 - 0,1008x_2 - 0,0914x_3 - 0,0352x_4 - 0,0164x_5 \\
 & + 0,0164x_1x_2 + 0,0258x_1x_3 + 0,0539x_2x_3 + 0,0164x_2x_4 + 0,0164x_2x_5 \\
 & + 0,0258x_3x_4 + 0,0164x_3x_5 - 0,0164x_2x_3x_5,
 \end{aligned} \tag{6.4}$$

где в кодированном виде представлены:

$x_1 = (X_1 - 5)/5$, где X_1 – отклонение загрузки флюсов от заданной нормы, т/ч;

$x_2 = (X_2 - 6)/6$, где X_2 – нормированное отклонение удельного расхода кислорода на тонну МС, б/р;

$x_3 = (X_3 - 5)/5$, где X_3 – отклонение расчетного содержания меди в штейне от нормируемого, %;

$x_4 = (X_4 - 0,6)/0,2$, где X_4 – расчетное содержание меди в шлаке, %;

$x_5 = (X_5 - 1340)/40$, где X_5 – температура расплава, °С;

Y_1 – степени согласованности, б/р.

Корректировка параметров процесса осуществляется по полиномиальным моделям (6.5) – (6.8) с визуализацией на АРМ оператора показаний основных параметров в виде графиков и/или на индикаторах.

Загрузка металлосодержащих (МС)

$$\begin{aligned}
Y_2 = & 49,875 + 26,375x_6 - 4,875x_7 + 3,875x_8 + 2,625x_9 \\
& - 1,375x_6x_7 + 2,375x_6x_8 + 3,625x_6x_9 - 1,375x_7x_8 \\
& + 1,125x_8x_9 - 1,125x_6x_7x_9 - 1,125x_7x_8x_9,
\end{aligned} \tag{6.5}$$

где в кодированном виде представлены:

$$x_6 = (X_6 - 15000)/10000, \quad \text{где } X_6 - \text{расход кислорода, м}^3/\text{ч};$$

$$x_7 = (X_7 - 2400)/1400, \quad \text{где } X_7 - \text{расход природного газа, м}^3/\text{ч};$$

$$x_8 = (X_8 - 0,05)/0,05, \quad \text{где } X_8 - \text{доля лежалых в МС, б/р};$$

$$x_9 = (X_9 - 17)/8, \quad \text{где } X_9 - \text{перепад температуры воды на сливе 1-2 ряда}$$

кессонов, °С;

Y_2 – уставка скорости загрузки металлосодержащих, т/ч.

Загрузка флюсов

$$\begin{aligned}
Y_3 = & 9,25 + 5,25x_{10} - 0,75x_{12} + 1,25x_{13} - 0,75x_{10}x_{12} + 1,25x_{10}x_{13} \\
& - 0,5x_{11}x_{13} - 0,25x_{12}x_{13} - 0,5x_{10}x_{11}x_{13} - 0,25x_{10}x_{13}x_{14},
\end{aligned} \tag{6.6}$$

где в кодированном виде представлены:

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

$$x_{11} = (X_{11} - 0,125)/0,125, \quad \text{где } X_{11} - \text{доля техногенных от МС, б/р};$$

$$x_{12} = (X_{12} - 1)/1, \quad \text{где } X_{12} - \text{отношение обороты/лежалые};$$

$$x_{13} = (X_{13} - 200)/50, \quad \text{где } X_{13} - \text{удельный расход кислорода, м}^3/\text{т};$$

Y_3 – уставка скорости загрузки флюсов, т/ч.

Текущие расчетные значения содержаний меди в конечных продуктах плавки определяют по полиномиальным моделям:

Содержание меди в штейне

$$\begin{aligned}
Y_4 = & 57,820 + 5,391x_{13} + 0,875x_{14} + 0,820x_{15} - 0,273x_{16} - 0,547x_7 \\
& + 0,547x_{11} - 0,383x_{13}x_7 - 0,164x_{13}x_{11} - 0,164x_{14}x_7 - 0,164x_{14}x_{11} \\
& - 0,164x_{15}x_{16} - 0,219x_{15}x_{11} - 0,766x_{16}x_7 + 0,273x_{13}x_{14}x_{16} \\
& + 0,711x_{13}x_{16}x_7 - 0,164x_{14}x_{16}x_{11} - 0,219x_{15}x_{16}x_{11},
\end{aligned} \tag{6.7}$$

где в кодированном виде представлены:

$$x_{13} = (X_{13} - 200)/50, \quad \text{где } X_{13} - \text{удельный расход кислорода, м}^3/\text{т};$$

$$x_{14} = (X_{14} - 0,125)/0,125, \quad \text{где } X_{14} - \text{доля богатых оборотов от МС, б/р};$$

$$\begin{aligned}
 x_{15} &= (X_{15} - 1340)/40, & \text{где } X_{15} & - \text{ температура расплава, } ^\circ\text{C}; \\
 x_{16} &= (X_{16} - 60)/5, & \text{где } X_{16} & - \text{ содержание кислорода в КВС, } \%; \\
 x_7 &= (X_7 - 2400)/1400, & \text{где } X_7 & - \text{ расход природного газа, м}^3/\text{ч}; \\
 x_{11} &= (X_{11} - 0,125)/0,125, & \text{где } X_{11} & - \text{ доля техногенных от МС, б/р}; \\
 Y_4 & - \text{ содержание меди в штейне, } \%;
 \end{aligned}$$

Содержание меди в шлаке

$$\begin{aligned}
 Y_5 &= 0,7088 + 0,0056x_{10} - 0,0619x_{17} - 0,0225x_{18} - 0,0169x_{13} + 0,0225x_{14} \\
 &+ 0,0056x_{10}x_{18} - 0,0338x_{10}x_{13} + 0,0056x_{17}x_{18} + 0,0056x_{18}x_{13} \\
 &- 0,0113x_{10}x_{17}x_{18} - 0,0169x_{10}x_{17}x_{13} + 0,01x_{17}x_{18}x_{13},
 \end{aligned} \tag{6.8}$$

где в кодированном виде представлены:

$$\begin{aligned}
 x_{10} &= (X_{10} - 60)/40, & \text{где } X_{10} & - \text{ загрузка МС, т/ч}; \\
 x_{17} &= (X_{17} - 28)/4, & \text{где } X_{17} & - \text{ содержание диоксида кремния в шлаке, } \%; \\
 x_{18} &= (X_{18} - 0,6)/0,3, & \text{где } X_{18} & - \text{ качество загрузки, б/р}; \\
 x_{13} &= (X_{13} - 200)/50, & \text{где } X_{13} & - \text{ удельный расход кислорода, м}^3/\text{т}; \\
 x_{14} &= (X_{14} - 0,125)/0,125, & \text{где } X_{14} & - \text{ доля богатых оборотов от МС, б/р}; \\
 Y_5 & - \text{ содержание меди в шлаке, } \%.
 \end{aligned}$$

Содержание диоксида кремния в шлаке

$$\begin{aligned}
 Y_6 &= 27,44 + 1,31 x_{21} + 0,63 x_{22} - 0,19 x_{23} - 1,0 x_{24} - 1,06 x_{25} + 0,19 x_{21} x_{23} \\
 &- 0,25 x_{21} x_{24} + 0,13 x_{22} x_{23} + 0,13 x_{22} x_{25} + 0,25 x_{23} x_{24} + 0,19 x_{23} x_{25} \\
 &+ 0,38 x_{24} x_{25} - 0,19 x_{21} x_{23} x_{25},
 \end{aligned} \tag{6.9}$$

где в кодированном виде представлены:

$$\begin{aligned}
 x_{21} &= (X_{21} - 9)/3, & \text{где } X_{21} & - \text{ загрузка флюсов рассчитанная по (3), т/ч}; \\
 x_{22} &= (X_{22} - 5)/5, & \text{где } X_{22} & - \text{ загрузка руды, т/ч}; \\
 x_{23} &= (X_{23} - 3)/3, & \text{где } X_{23} & - \text{ загрузка лежалых рассчитанная как } 0,05 \cdot Y_2, \text{ т/ч}; \\
 x_{24} &= (p - 1)/1, & \text{где } p & - \text{ количество залитых ковшей конвертерного шлака}; \\
 x_{25} &= (X_{25} - 60)/5, & \text{где } X_{25} & - \text{ содержание кислорода в КВС, } \%; \\
 Y_6 & - \text{ содержание диоксида кремния в шлаке, } \%.
 \end{aligned}$$

При уровне согласованности выше или равному регламентируемому 0,45 процесс продолжают в основном режиме, а при ниже регламентируемого – идентифицируют «конфликт» и корректируют изменением составляющих

загружаемой шихты путем изменения входных переменных до достижения уровня согласованности по (6.4) не ниже 0,45 при требуемом уровне содержания меди в штейне, и при расхождении расчетного содержания меди в штейне от заданного на величину 1 – 1,5%, пересчитывают величины управляющих воздействий по (6.5) и (6.6) до достижения заданного диапазона по меди в штейне по полиномиальной модели (6.7) с отслеживанием расчетных значений меди в шлаке по полиномиальной модели (6.8) ниже критического 0,8.

При идентификации любого из конфликтов К1– К6 анализируют разрешения конфликтов по (6.4) – (6.9) и по результатам корректируют технологический процесс путем изменения соотношения компонентов, входящих в состав загружаемой шихты.

Качество загрузки – синтетическая переменная, учитывающая компоновку шихты из основных составляющих. Качество загрузки обуславливает физико-химическое состояние и особенности ведения процесса при работе на богатые штейны. На качество загрузки существенное влияние оказывают доля лежалых компонентов шихты из-за малого содержания в них серы и суммарная влажность шихты в силу негативного ее действия на тепловую работу ПВ-3 в целом.

$$\begin{aligned}
 Y_7 = & 0,6 - 0,0938x_{11} - 0,0281x_{12} - 0,0938x_1 - 0,0469x_{21} + 0,0188x_{22} \\
 & - 0,0281x_{11}x_{12} + 0,0188x_{11}x_1 + 0,0094x_{11}x_{21} + 0,0094x_{12}x_1 \\
 & + 0,0188x_{12}x_{22} + 0,0094x_1x_{21} - 0,0094x_{11}x_{12}x_1 - 0,0094x_{11}x_1x_{21}, \quad (6.10)
 \end{aligned}$$

где в кодированном виде представлены:

$$x_{11} = (X_{11} - 0,125)/0,125, \quad \text{где } X_{11} - \text{доля техногенных от МС, б/р;}$$

$$x_{12} = (X_{12} - 1)/1, \quad \text{где } X_{12} - \text{отношение обороты/лежалые, б/р;}$$

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

$$x_{21} = (X_{21} - 15)/5, \quad \text{где } X_1 - \text{влажность шихты, \%};$$

x_{22} – содержание меди в оборотах, неколичественная переменная (низкое «–1», высокое «+1»);

$$Y_7 - \text{качество загрузки, б/р, в интервале от 0,3 до 0,9 при средней 0,6,}$$

В случае возникновения конфликта К7 значение температуры расплава в реакционной зоне печи аппроксимируют полиномиальной моделью (6.11)

$$Y_8 = X_5 = 1322,47 + 2,84x_{10} + 13,59x_{13} - 5,91x_{19} + 7,34x_7 + 5,09x_{10}x_{13} + 5,09x_{10}x_7 - 1,91x_{19}x_7 - 1,97x_{19}x_{20} + 1,97x_{10}x_{13}x_{19} - 1,91x_{10}x_{13}x_7, \quad (6.11)$$

где в кодированном виде представлены:

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

$$x_{13} = (X_{13} - 200)/50, \quad \text{где } X_{13} - \text{удельный расход кислорода, м}^3/\text{т;}$$

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

$$x_7 = (X_7 - 2400)/1400, \quad \text{где } X_7 - \text{расход природного газа, м}^3/\text{ч;}$$

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

Y_8 – температура расплава в реакционной зоне, °С.

Таким образом, модели управления ПВ по степени согласованности процесса в целом (рисунок 6.8), локальные модели (6.5), (6.6) и (6.10) представляют загрузку, (6.7)-(6.9) – конечные показатели качества продуктов, (6.11) – тепловую нагрузку в ванне печи, а все они обуславливают степень согласованности по модели (6.4).

Таким образом в результате предложенного концептуального и формального описания печи Ванюкова, была сформирована система полиномиальных уравнений, позволяющих оценивать ее состояние и происходящие в ней процессы. Ограничения определяют текущий режим ведения процесса в соответствии с Технологической инструкцией предприятия. Такой подход гарантирует принятие решений по рассчитанной модели ИАСУ ПВ без инициации предаварийных и аварийных ситуаций.

6.2.5 Архитектура ИАСУ ПВ

Предложено рассматривать ИАСУ ПВ как экспертную систему [58-61], в рамках которой реализуется проактивный интеллектуальный мониторинг и управление процессом плавления в агрегате (рисунок 6.9). Управление реализовано как набор рекомендаций оператору и старшему плавильщику для поддержания технологического баланса процесса при выполнении поставленных целей по качеству конечных продуктов плавления, получению заданного количества готовой продукции (ковшей штейна) и проплаву некондиционных техногенных материалов.

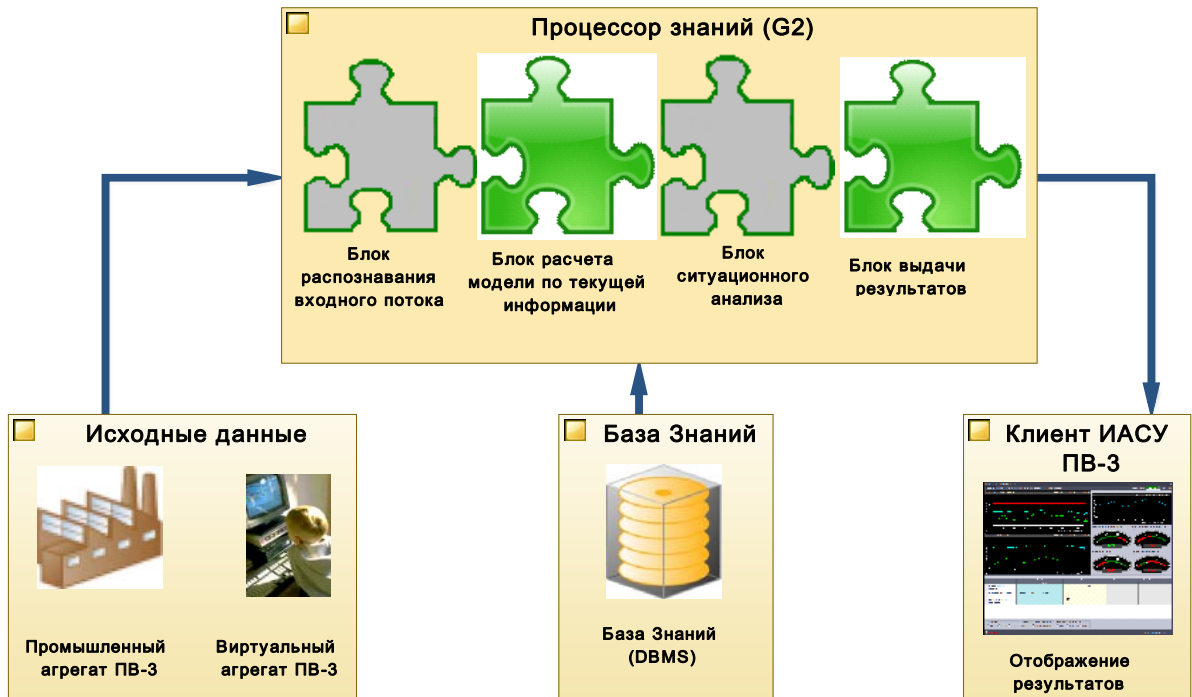


Рисунок 6.9 – Обобщенная архитектура системы ИАСУ ПВ

Основными элементами ИАСУ ПВ (см. рисунок 6.9), как и любой экспертной системы, являются:

- блок распознавания входного потока информации (получение вывода на знаниях);
- блок расчета модели по текущей ситуации;
- блок ситуационного анализа;
- блок принятия решений.

Рассмотрим более подробно данные элементы. В момент старта экспертной системы процессор знаний считывает всю информацию из базы знаний, которая хранится в хранилище, и строит модель виртуального агрегата (печи Ванюкова) и реализуемого в нем процесса Ванюкова. Далее, по мере протекания процесса в агрегате, в систему ИАСУ поступают данные от АСУ. Эти данные характеризуют как состояние процесса, так и состояние агрегата ПВ. Данные попадают в блок распознавания, идентифицируются с точки зрения критериев технологической согласованности и затем на основании этих данных выполняется расчет по модели процесса Ванюкова. Результаты этого многомодельного расчета анализируются в блоке ситуационного анализа и при возникновении нарушения технологического

баланса ситуация идентифицируется системой как «конфликтная». Далее вырабатывается решение относительно восстановления технологического баланса. Полученные решения, а также информация о текущем состоянии процесса вместе с информацией о конфликтах отображаются в клиентском модуле ИАСУ ПВ, как показано на рисунок 6.9. Обновление модели осуществляется каждую минуту.

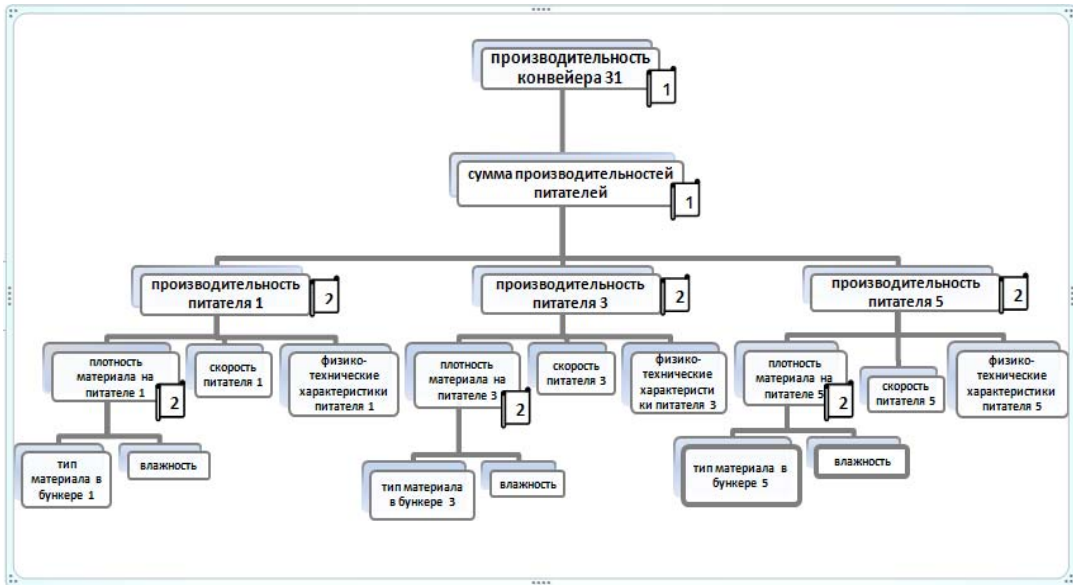
На рисунке 6.10 представлены фрагменты общей архитектуры в виде алгоритма расчета производительности сборного конвейера подачи шихты в реакционную зону ПВ от трех питателей (рисунок 6.10 а) и алгоритма выдачи и обработки рекомендаций (рисунок 6.10 б) для принятия решения оператором-технологом.

Контроль и управление всеми агрегатами и исполнительными механизмами осуществляется со станций оператора АСУ ПВ, расположенных в помещении операторной плавильного цеха.

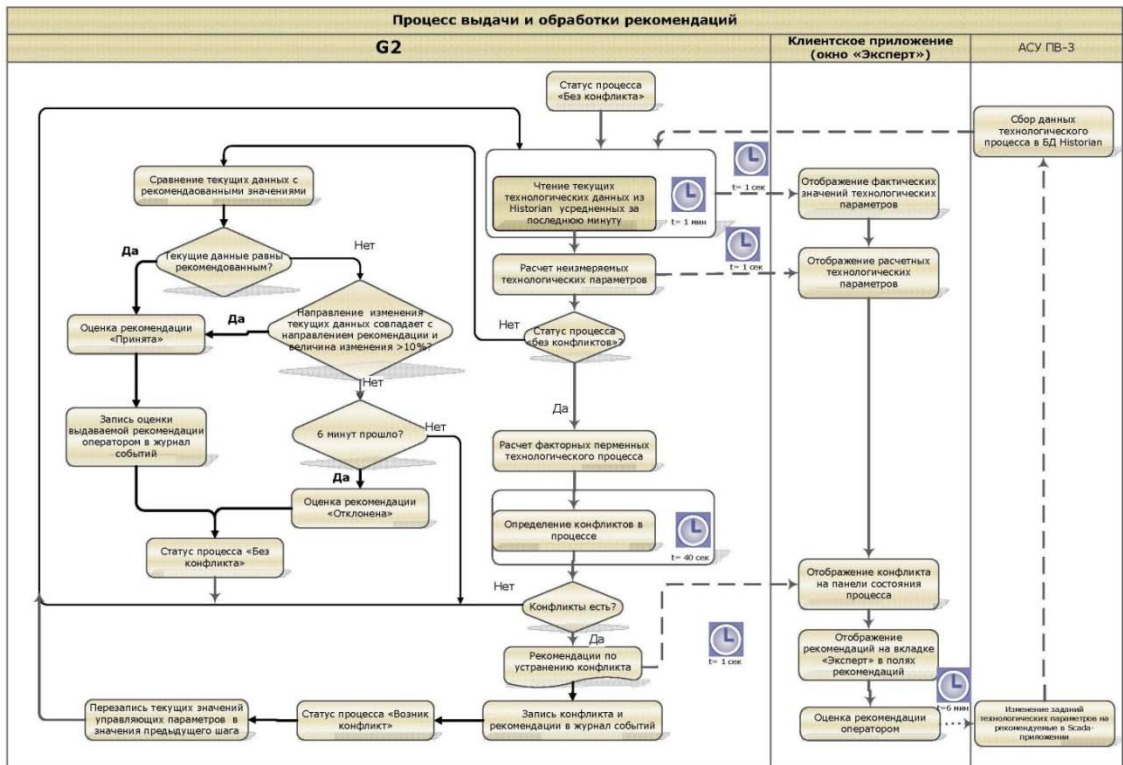
В дополнение к существующим станциям предоставления оператору пользовательского интерфейса экспертной системы оператора используется специализированное АРМ, предназначенное для ИАСУ ПВ.

Архитектурно и функционально ИАСУ ПВ выглядит как дополнение к существующей АСУ ПВ, то есть как расширение функциональных и информационных функций действующей системы управления.

На рисунке 6.11 представлена схема реализации модели «Качество загрузки» на уровне сигналов в виде программного продукта на базе платформы G2 фирмы Gensym (США).



а)



б)

Рисунок 6.10 – Фрагменты общей архитектуры в виде алгоритмов:
 а) расчета производительности сборного конвейера подачи шихты в реакционную зону ПВ от трех питателей; б) выдачи и обработки рекомендаций для принятия решения оператором-технологом

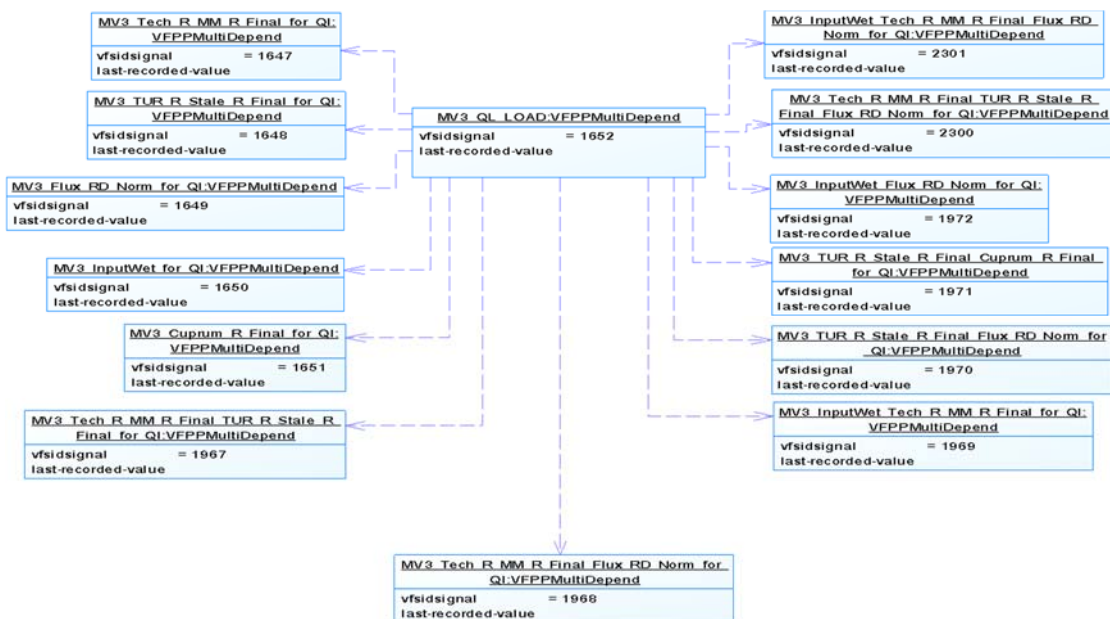


Рисунок 6.11 – Схема реализации модели «Качество загрузки» на уровне сигналов

6.2.6 Практическая реализация

ИАСУ ПВ обеспечивает в режиме реального времени выполнение минутных расчетов следующих прикладных функций:

- оценка количества и качества загрузки подаваемой в печь шихты;
- прогноз качества конечных продуктов;
- визуализация действий оператора по критериям технологической сбалансированности процесса;
- автоматический анализ качества управления технологическим процессом;
- накопление базы знаний по управлению за весь период эксплуатации системы;
- моделирование виртуального агрегата ПВ для использования в режиме «Тренажер» с целью обучения персонала.

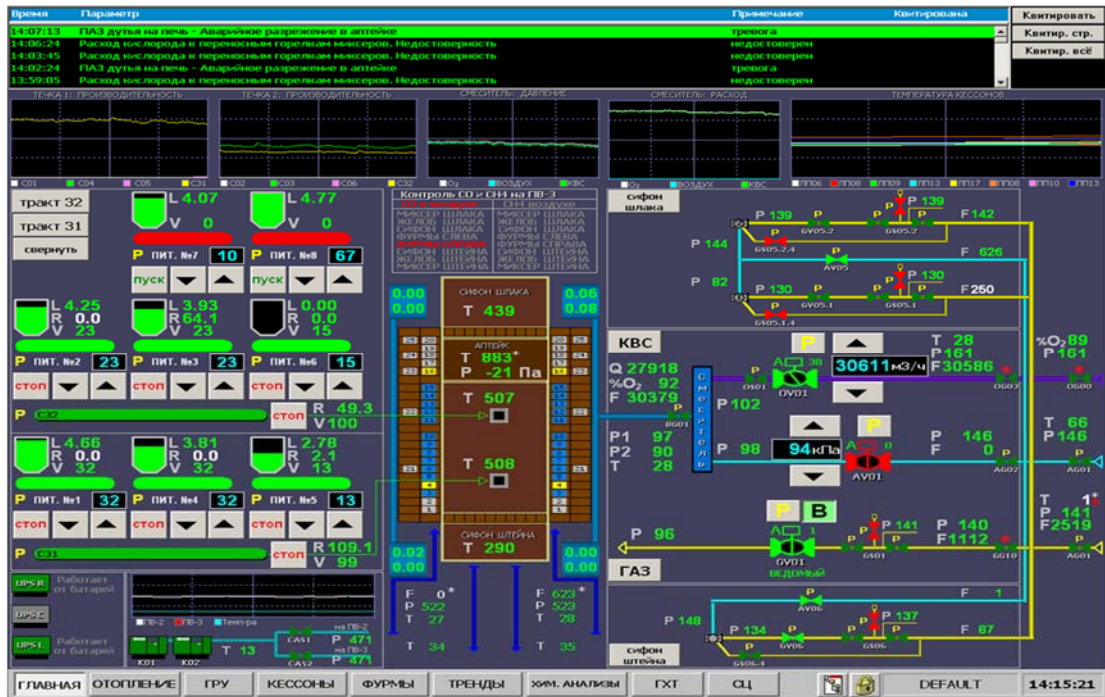
Поскольку основными критериями состоятельности любой системы является ее прогностические способности, то продемонстрируем их на нескольких примерах из эксплуатации ИАСУ ПВ Медного завода [249,252,254].

Результаты моделирования ИАСУ ПВ визуализируются на АРМ оператора, как показано на рисунке 6.12. Рисунок 6.12а отражает интерфейс АСУ, на котором

выведены все основные показатели загрузки и дутья отдельно. В главном окне интерфейса ИАСУ на рисунке 6.12б цифрами пронумерованы его основные части:

- 1 – графическое отображение одного из основных критериев – «Удельный расход кислорода на тонну металлосодержащих»;
- 2 – отображение критерия «Содержание диоксида кремния в шлаке»;
- 3 – отображение критерия «Содержание меди в штейне»;
- 4 – индикатор «Содержание меди в шлаке»;
- 5 – индикатор «% флюсов от металлосодержащих»;
- 6 – индикатор «Качество загрузки»;
- 7 – индикатор «Температура расплава»;
- 8 – поле отражения почасовой производительности по бункерам или материалам;
- 9 – поле отражения наличия конфликта и его идентификация;
- 10 – поле выбора основного уровня «Удельный расход кислорода на тонну металлосодержащих»;
- 11 – загрузка конвертерного шлака.

Анализ поведения графиков в поле 1 (рисунок 6.12б) показывает устойчивое ведение процесса по факту в среднем $180 \text{ м}^3/\text{т}$, что ниже рекомендуемого удельного расхода $200 \text{ м}^3/\text{т}$. Наблюдаемые пики фактических значений графика 1 связаны с проведением штатной операции фурмования устройств подачи дутья в расплав. Однако на протяжении всего периода видно, что оператор осознанно «удерживал» процесс у выбранной им отметки $180 \text{ м}^3/\text{т}$. Линии 150 и $250 \text{ м}^3/\text{т}$ отражают предельно допустимые ограничения по данному критерию, за пределами которых гарантированно происходит потеря качества конечных продуктов. Из практики известно, что нахождение процесса за пределами обозначенных границ в течение более 10 минут способно привести к критическим состояниям: ниже $150 \text{ м}^3/\text{т}$ – недоокисление расплава (конфликт К2), и, как следствие, холодный ход печи; выше $250 \text{ м}^3/\text{т}$ – переокисление расплава (конфликт К1), и, как следствие, горячий ход печи. Отражение прогностической способности ИАСУ ПВ по другим критериям также представлено в количественном виде.



а)



б)

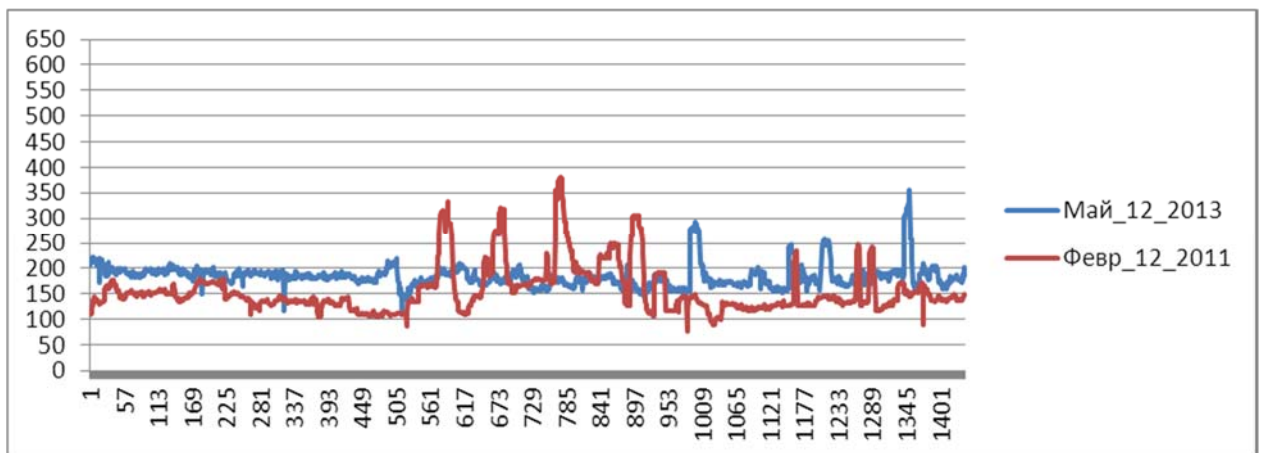
Рисунок 6.12 – Интерфейс на АРМ оператора (обозначения полей – в тексте):

а – АСУ ПБ; б – ИАСУ ПБ

Таким образом, 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. Результатом работы системы является также оптимизация режимов по расходу природного газа и кислорода в дутье.

Визуализация трендов по основным критериям оказывает, кроме того, положительное психологическое воздействие на оператора-технолога, поскольку «оправдывает» в количественном виде реализацию принимаемого им решения при управлении процессом.

Подтверждением этому служат показатели работы экипажей смен плавильщиков за одни сутки в периоды до (февраль 2011) и после (май 2013) внедрения ИАСУ ПВ в промышленную эксплуатацию (рисунок 6.13).



Описательные статистики

	N	Минимум	Максимум	Среднее	Стд. отклонение
Май_12_2013	1441	108,71	356,28	184,050	22,20717
Февр 12 2011	1441	75,58	379,89	155,719	46,87030

Рисунок 6.13 – Изменение значений удельного расхода кислорода на тонну металлосодержащих в течение суток

ИАСУ ПВ обладает следующими потребительскими характеристиками, которые соответствуют моделям представления знаний на рисунке 1.9 (глава 1):

- интуитивно понятное освоение системы технологическим персоналом;

- программная и информационная совместимость с АСУ ПВ и другими информационными системами;
- возможность адаптации системы под другие агрегаты на уровне наполнения базы знаний без изменения программного ядра системы;
- локализация всех элементов пользовательского интерфейса на русском языке;
- надёжность, открытость, масштабируемость – возможность дальнейшего расширения и модернизации.

Разработанная компанией «Сумма технологий» под научно-методическим руководством автора и внедренная на Медном заводе ЗФ «ГМК «Норильский никель» Интеллектуальная автоматизированная система мониторинга и управления процессом Ванюкова ИАСУ ПВ как СЛО позволяет сделать некоторые обобщения применительно к использованию ее результатов в других отраслях промышленности и областях знаний.

ИАСУ в данной версии использует две уникальные интеллектуальные технологии, обладающие универсальностью в широком смысле. Первая из них, разработанная в настоящем диссертационном исследовании, – универсальная технология «Полиномиальное преобразование НЕ-факторов», суть которой состоит в преобразовании вербальных знаний эксперта в модель в виде нелинейной полиномиальной функции, что дает возможность передать специфику изучаемого явления в данной области через опыт и интуицию профессионалов применительно уже к решению конкретной задачи. Вторая – представление знаний «Семантической сетью на базовой онтологии», позволяющее описать сложную многофакторную модель в виде семантической сети на специфичном ограниченном словаре как наиболее приоритетному способу формализации знаний в прикладной онтологии [41], что существенно снижает размерность предметной области без потери семантики и функциональности всех ее элементов, и обладающей свойством универсальности по отношению к различным предметным областям [41,67]. Синтез этих двух независимых технологий предоставляет возможность создания ИАСУ практически для любого СЛО («сложной системы»)

при наличии существующей базовой автоматизации заказчика и высококвалифицированных специалистов, эксплуатирующих или исследующих такие СЛО в условиях «существенной неопределенности» [67].

Предлагаемый подход к построению ИАСУ обладает несколькими преимуществами.

Во-первых, он дает существенную экономию времени и средств в силу рецептурной разработанности методики, требует минимум обращений к эксперту на его профессиональном языке при построении системы моделей состояния СЛО и использует минимум «словарного запаса» за счет рационального использования онтологического подхода.

Во-вторых, использование ЭЗ применительно к оцениванию состояния конкретного СЛО осуществляется в условиях технологических регламентов его функционирования, что сводит к минимуму степень риска выработки системой неправильного решения, а мониторинг в режиме реального времени способствует раннему обнаружению приближения к запредельным (предаварийным) состояниям процесса.

В-третьих, *фактически реализован наиболее общий подход к решению многоуровневого распознавания состояния сложных технологических процессов, объектов или явлений в любой отрасли – космонавтика, строительное дело, цветная и черная металлургия, горное и нефтегазовое производство, химическая промышленность, тепло-электроэнергетика, медицина, сельское хозяйство и др.*

В-четвертых, рассматривая процесс создания ИАСУ подобного рода со структурно-топологических позиций [130,169,262], удастся акцентировать внимание непосредственно на свойствах механизма процесса распознавания состояния СЛО с использованием комплекта моделей, построенных на знаниях. Правильность такого подхода находит подтверждение в фундаментальном труде [168], где поставлена и решена проблема потоково-многоуровневого распознавания состояния СЛО, причем основным методологическим принципом в указанной работе, как уже указывалось ранее, выступает переход от конструкций

метрических пространств к конструкциям более общего порядка – топологическим пространствам.

Следует отметить, что архитектура ИАСУ ПВ была выстроена независимо от разработанного в [168] структурно-топологического подхода (см. Приложение II). Однако теоретически строгое обоснование подхода [168] переводит его в разряд универсальных. Именно это свойство доказывает методологически правильный выбор представленной выше архитектуры ИАСУ ПВ применительно к совершенно другой области техники – цветной металлургии. Абстрактное математическое толкование топологии не накладывает ограничений на использование всего богатства полимодельного методологического аппарата решений задач распознавания [108-112,146-149,167-169,262], что и продемонстрировано в данном подразделе. Заметим также, что использование структурно-топологического подхода стратегически важно на начальных этапах проектирования архитектуры вычислительных моделей во избежание самых трудно определяемых ошибок – методологических.

На основании проведенных выше исследований можно констатировать, что цели создания ИАСУ ПВ Медного завода достигнуты полностью. Внедрение в промышленную эксплуатацию данной системы оформлено актом от 30 мая 2013 г. и получен патент РФ № 2571968 от 27.12.2015 [161].

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 6

1. Проведена экспериментальная апробация теоретических исследований при построении моделей нового класса задач многопараметрического определения состояния СЛО в динамических условиях на двух примерах производственных процессов.

2. Приведено решение актуальной практической задачи построения информационной модели нечеткого логического регулятора с интеллектуальной базой знаний в виде двух моделей оценивания состояний СЛО для их последующего использования при управлении промышленными агрегатами, функционирующими в условиях неопределенности. Объектом исследования был выбран процесс обжига сульфидного концентрата в печи кипящего слоя

(Никелевый завод ЗФ «ГМК «Норильский никель», г. Норильск). В процессе исследования были получены объектно-ориентированная модель процесса обработки числовой информации с использованием нечеткого логического регулятора, алгоритм последовательного взаимодействия множества подсистем обработки данных о протекании технологического процесса, а также алгоритм выработки управляющих воздействий на основе формализации экспертных знаний. Прогностическая точность вырабатываемого управляющего воздействия составляет 8%. Автоматическое управление процессом обжига сульфидного концентрата в печи кипящего слоя на основе предложенного способа характеризуется отсутствием резких скачков в выходных показателях (по сравнению с ручным режимом управления), снижением количества и длительности периодов «нулевых» загрузок, что позволило увеличить суммарную производительность печи на 30% по загрузке. Разработанное техническое решение защищено патентом РФ № 2204616 от 20.05.03.

3. Разработана и внедрена в промышленную эксплуатацию интеллектуальная АСУ (ИАСУ) плавильным агрегатом большой единичной мощности (производительность до 160 тонн в час).

Разработанная ИАСУ в данной версии использует две уникальные интеллектуальные технологии, обладающие универсальностью в широком смысле. Первой из них является универсальная технология, названная «Полиномиальное преобразование НЕ-факторов», суть которого изложена в главах 2-4, позволила передать специфику данной области техники через опыт и интуицию профессионалов применительно уже к конкретному процессу. Вторая – универсальная технология, названная «Семантической сетью на базовой онтологии», позволила описать сложную многофакторную модель функционирования плавильного агрегата в виде семантической сети с использованием специфического ограниченного словаря, что существенно снизило размерность нечетко-возможностных моделей, описывающих рассматриваемой предметной области без потери семантики и функциональности при формальном представлении всех ее элементов. Поскольку в основе синтеза

моделей используются не данные, а знания и опыт эксперта преимущественно в вербальном виде, то топологией множества знаний выступает сама базовая онтология, образуя, тем самым, топологические пространства принципиально нового типа.

Синтез этих двух независимых технологий дает возможность создания ИАСУ практически для любой «сложной технической системы» при наличии соответствующих аппаратно-программных комплексов автоматизации заказчика и высококвалифицированных специалистов, эксплуатирующих такие системы в условиях «существенной неопределенности». Построенная система сводит к минимуму степень риска выработки неправильного управленческого решения, а мониторинг в режиме реального времени способствует раннему обнаружению приближения к запредельным (предаварийным) состояниям процесса. Получен патент РФ № 2 571 968 (Бюл. № 36 от 27.12.2015).

4. Фактически реализован наиболее общий подход к решению проблемы многоуровневого распознавания состояния сложных технологических процессов, объектов или явлений в различных предметных областях— космонавтика, строительное дело, цветная и черная металлургия, горное и нефтегазовое производство, химическая промышленность, тепло-электроэнергетика, медицина, сельское хозяйство и др.

5. Разработанные методики построения моделей описания состояния СЛО с использованием явных и неявных знаний экспертов для принятия управленческих решений в каждой конкретной задаче фактически представляют основу нового методологического подхода, позволяющего разрабатывать конкретные пути проникновения математики не только в технические, но и в гуманитарные науки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решена научная проблема разработки моделей и методов представления, формализации и использования явных и неявных экспертных знаний для оценивания состояния сложных объектов на основе дальнейшего развития нечетко-возможностного подхода

Это позволяет рассматривать эксперта как «интеллектуальную информационно-диагностическую систему», а также сохранять и тиражировать его умения, навыки, опыт и знания для решения задач оценивания состояния СЛО. Получены следующие результаты, составляющие итоги диссертационного исследования.

1. Проведенный системный анализ решаемой проблемы, который позволил на основе дальнейшего развития нечетко-возможностного подхода разработать концепцию оценивания состояния СЛО на основе явных и неявных экспертных знаний с использованием дополнительной неколичественной (вербальной) информации для построения математических моделей оценивания состояния СЛО в условиях существенной неопределенности.

2. Разработаны методологические и методические основы построения и использования нового класса математических моделей оценивания состояния СЛО, базирующихся на экспертных знаниях. При этом предложены: новые формы представления нечетких чисел, расширенные (с использованием методов символической математики) и дополненные арифметическими действиями над ними для сохранения исходного уровня нечеткости явных и неявных знаний экспертов в условиях применения теории планирования экспериментов.

3. Разработан комбинированный метод построения моделей оценивания состояния СЛО как синтез методов представления явных и неявных экспертных знаний и методов теории планирования экспериментов, который позволил ввести новый класс моделей для оценивания и прогнозирования состояния СЛО в условиях существенной неопределенности.

4. Разработаны модели представления формализованного описания интуитивно-словесных и неявно заданных знаний эксперта о состоянии сложных

объектов в аналитическом виде с учетом количественной и неколичественной (вербальной) экспертной информации.

5. Разработаны методика и критерии проверки адекватности и полезности синтезированных моделей оценивания состояния СЛО, различных по принадлежности, назначениям, конструктивным особенностям и условиям эксплуатации, функционирующих в условиях неопределенности. Данные критерии проверки предоставляют ЛПР возможность априорного оценивания несмещенности и эффективности получаемых с помощью полиномиальных моделей значений.

6. Реализация результатов диссертационного исследования по экспериментальной апробации научно-методических основ формализации явных и неявных экспертных знаний о состоянии СЛО в динамически изменяемых условиях аналитическими выражениями осуществляется без больших затрат времени и ресурсов, дает возможность сохранять и тиражировать знания и опыт высококвалифицированных специалистов в различных предметных областях.

Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы. Синтез оптимальных программ управления СЛО в различных условиях изменяющейся обстановки с целью дальнейшего перехода от слабоструктурированных к структурированным задачам. Совершенствование системы извлечения и представления знаний эксперта для проведения упреждающего моделирования и многовариантного анализа различных сценариев реализации жизненных циклов рассматриваемых объектов как одного из этапов проактивного управления СЛО.

Результаты проведенной диссертационной работы соответствуют паспорту специальности 05.13.01– «Системный анализ, управление и обработка информации»:

П. 1 Теоретические основы и методы системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.

П. 4. Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.

П. 5. Разработка специального математического и алгоритмического

обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.

П. 10. Методы и алгоритмы интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений в технических системах.

П. 13. Методы получения, анализа и обработки экспертной информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов, О.В. Прогнозирование состояния технических систем / О.В.Абрамов, А.Н.Розенбаум. – М.: Наука, 1990. – 126 с.
2. Абросимов, В.К. Оценка адекватности моделей управляемых динамических систем / В.К. Абросимов, Н.Ю. Анисимов // АиТ. – 1988. – N2 – С. 36-42..
3. Аверкин, А.Н. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта (Под ред. Д.А. Поспелова) / А.Н. Аверкин, И.З. Батыршин, А.Ф. Блишун и др. – М.: Наука, 1986. – 312 с.
4. Аверкин, А.Н. Использование нечетких отношений в моделях представления знаний / А.Н. Аверкин, М.Х. Нгуен //Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1989. – № 5. – с. 20-33.
5. Аверкин, А.Н. Мягкие вычисления – основа новых информационных технологий / А.Н. Аверкин //Пятая национальная конференция с международным участием «Искусственный интеллект – 96». Сборник научных трудов. – М. 1996. – С. 23 – 28.
6. Авен, П.О. Функциональное шкалирование / П.О. Авен, А.А. Ослон, И.Б. Мучник. – М.: Наука, 1988. – 230 с.
7. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский – М.: Наука, 1976. - 280 с.
8. Азгальдов, Г.Г. Теория и практика оценки качества товаров. Основы квалиметрии / Г.Г. Азгальдов – М.: Экономика, 1982. – 168 с.
9. Александров, В.В. Теория риска и его стоимость. //Моделирование и Анализ Безопасности и Риска в Сложных Системах / В.В. Александров // Труды Международной Научной Школы МА БР – 2002 (Санкт-Петербург, 2-5 июля, 2002 г.). – СПб.: Издательство «Бизнес-Пресса, 2002. – с.169-171.
10. Алексеев, А.В. Интерпретация и определение функций принадлежности нечётких множеств / А.В. Алексеев // Методы и системы принятия решений (Рижск. Политехн. Инст.). – Рига: изд-во РПИ, 1979. – С.42-50.

11. Алексеев, А.В. Применение нечеткой математики в задачах принятия решений / А.В. Алексеев // Прикладные задачи анализа решений ,в организационно-технических системах. – Рига.: Риж. политехн. Ин-т, 1983. – С. 12 –17.
12. Алексеева А.Ю. Интеллект и технологии: монография / А.Ю. Алексеева, Е.А. Никитина – Москва: Проспект, 2016. – 96 с.
13. Алиев, Р.А. Производственные системы с искусственным интеллектом / Р.А. Алиев, Н.М. Абдикеев, М.М. Шахназаров. – М.: Радио и связь, 1990.-264 с.
14. Алиев, Р.А. Нечеткие модели управления динамическими системами / Р.А. Алиев, Э.Г. Захарова, С.В. Ульянов // Итоги науки и техники. Техн. кибернетика. –Т.29. – М.: ВИНТИ АН СССР, 1990. – С. 34 – 42.
15. Алиев, Р.А. Нечеткие регуляторы и интеллектуальные промышленные системы управления / Р.А. Алиев, Э.Г. Захарова, С.В. Ульянов // Итоги науки и техники. Техн. кибернетика.– М.: ВИНТИ АН СССР, 1990. – Т.32. – С. 23 – 27.
16. Алиев, Р.А. Управление производством при нечеткой исходной информации/ Р.А. Алиев, А.Э. Церковный, Г.А. Мамедова – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 240 с.
17. Айвазян, С.А., Статистическое исследование зависимостей / С.А. Айвазян – М.: Металлургия, 1968. – 227с.
18. Айвазян, С.А. Прикладная статистика и основы эконометрики / С.А. Айвазян, В.С. Мхитарян – М.: ЮНИТИ, 1998. – 1022 с.
19. Алексеев А.В. Применение нечеткой математики в задачах принятия решений / А.В. Алексеев//Прикладные задачи анализа решений в организационно-технических системах – Рига: Риж. политехн. и-т, 1983. – С.38-42.
20. Акимов, В.А. Риски в природе, техносфере, обществе и экономике / В.А. Акимов, В.В. Лесных, Н.Н. Радаев – М.: Деловой экспресс, 2004. – 352 с.
21. Аффифи, А., Эйзен С. Статистический анализ: Подход с использованием ЭВМ / А. Аффифи, С. Эйзен - М.: Мир, 1982. – 488 с.

22. Алиев, Р.А. Представление знаний в интеллектуальных роботах на основе нечетких множеств / Р.А. Алиев, А.З. Церковный – ДАН СССР, 1988. – Т.299. – №6. – С. 142 – 148.
23. Алиев, Р.А. Нечеткие алгоритмы и системы управления. / Р.А. Алиев, С.В. Ульянов. – М.: Знание, 1990. – 134 с.
24. Андрейчиков, А.В. Интеллектуальные информационные системы: Учебник / А.В. Андрейчиков, О.Н. Андрейчикова – М.: Финансы и статистика, 2004. – 424 с.
25. Антонов, Г.Н. Концепция безопасности систем / Г.Н. Антонов, И.А. Рябинин // Морской сборник. – 1995. – №10. – С. 42 – 49.
26. Арнольд, В.И. Теория катастроф / В.И. Арнольд – М.:Наука, 1990. л – 128с.
27. Артамонов, В.С. Элементы превентивного управления рисками при эксплуатации системных объектов. Под общей редакцией А.В. Спесивцева / В.С. Артамонов, И.П. Кардашев, В.Б. Моторин, А.В. Спесивцев, Н.И. Уткин – СПб: Изд-во СПбГПУ, 2003. – 132 с.
28. Асанович, В.Я. Выявление критичных элементов при управлении безопасностью сложных объектов / В.Я. Асанович, В.А. Зеленцов, А.Н. Павлов // 6-я Научная конференция «Управление и информационные технологии» (УИТ-2010), РФ, г. Санкт-Петербург, 12 - 14 октября 2010 г. Материалы. – СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2010. – С. 238 – 243.
29. Астанков, А.М. Снижение рисков возникновения опасных последствий при эксплуатации насосных агрегатов заправочного оборудования ракетно-космических комплексов / А.М. Астанков, А.В. Спесивцев, А.В. Вагин // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2016. – №1[37]. – С. 6-14.
30. Астанков, А.М. Оценивание технического состояния насосных агрегатов заправочного оборудования ракетно-космических комплексов на основе логико-лингвистических моделей / А.М. Астанков, А.В. Спесивцев, В.В. Типаев // Сб. докладов XXXI Межведомственной научно-технической конференции «Развитие научно-технических аспектов методологии испытаний и эксплуатации с

целью повышения эффективности применения существующих средств и систем экспериментально-испытательной базы» (2-3 ноября 2015 г.). – Плесецк, 2015. – С. 28-32.

31. Архипова, Н.И., Кульба В.В. Управление в чрезвычайных ситуациях. 2-е изд., перераб. и доп./ Н.И. Архипова, В.В. Кульба – М.: Рос. гос. гуманитар. ун-т, 1998. – 316 с.

32. Асатурьян, В.И. Теория планирования эксперимента / В.И. Асатурьян – М.: Радио и связь, 1983. – 302 с.

33. Балашов, Е.П. Эволюционный синтез систем // Е.П. Балашов. – М.: Радио и связь. 1985. – 328 с.

34. Баронец, В.Д. Модель представления функции принадлежности в экспертных системах / В.Д. Баронец, М.А. Гречихин. – Автоматика и телемеханика, 1992, № 6. – С. 156-160.

35. Беллман, Р. Принятие решений в расплывчатых условиях / Р. Беллман, Л.Заде // В кн. Вопросы анализа и процедуры принятия решений. – М.: Мир, 1976. – С.172-215.

36. Берштейн, Л.С. Проектирование инструментальных средств экспертных систем с нечеткой логикой / Л.С. Берштейн, С.Я. Коровин, А.Н. Мелихов. – Изв. АН СССР. Техническая кибернетика, 1989. – № 2. – С. 152 – 160.

37. Бешелев, С.Д. Математико-статистические методы экспертных оценок / С.Д. Бешелев, Ф.Г. Гурвич. – М: Статистика, 1980. – 263 с.

38. Биргер, И.А. К математической теории технической диагностики / И.А. Биргер // Проблемы надежности в строительной механике. – Вильнюс, РИНТИП, 1968. – 26 – 32.

39. Бирюков, Г.П. Основы проектирования ракетно-космических комплексов: Методология обоснования облика комплексов / Г.П. Бирюков, Б.К. Гранкин, В.В. Козлов, В.Н. Соловьев – С-Пб.: Издательство «АЛФАВИТ», 2002. – 395 с.

40. Бирюков, Г.П. Какое решение лучше? Метод постановки приоритетов / Г.П. Бирюков, Б.К. Гранкин, В.В. Козлов, В.Н. Соловьев. – Л.: Лениздат, 1982. – 160 с.
41. Боргест, Н.М. Границы онтологии проектирования / Н.М. Боргест // Онтология проектирования. – 2017. – Т.7, №1(23). – С.7-33. – DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-1-33.
42. Борисов, А.Н. Прогнозирование состояния сложной системы с использованием теории размытых множеств / А.Н. Борисов, Г.Н. Вульф, Я.Я. Осис // Кибернетика и диагностика. – Вып.4. – Рига: Знание, 1972. – С.79-84.
43. Борисов, А.Н. Обработка нечеткой информации в системах принятия решений / А.Н. Борисов, А.В. Алексеев, Г.В. Меркурьев и др. – М.: Радио и связь, 1989. – 304с.
44. Борисов, А.Н. Принятие решений на основе нечетких моделей: Примеры использования / А.Н. Борисов, О.А. Крумберг, И.П. Федоров. – Рига: Зинатне, 1990. – 184 с.
45. Болотин, В.В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. – 2-е изд., перераб. и доп. / В.В. Болотин. – М.: Стройиздат, 1981. – 351с.
46. Болотин, В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций / В.В. Болотин. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.
47. Брандт, З. Статистические методы анализа наблюдений / З. Брандт. – М.: Мир, 1975. – 312 с.
48. Бродский, В.З. Введение в факторное планирование эксперимента / В.З. Бродский. – М.: Наука, 1976. – 388 с.
49. Брюханов, А.Ю. Логико-лингвистическое моделирование для решения агроэкологических проблем / А.Ю. Брюханов, А.В. Спесивцев, А.В. Трифанов, И.А. Субботин // Сб. докладов. XIX Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям SCM-2016, 25-27 мая 2016, Санкт-Петербург, 2016. Т1 – С.236-239.

50. Брюханов, А.Ю. Моделирование негативного воздействия технологий переработки отходов животноводства /А.Ю. Брюханов, А.В. Спесивцев, И.А. Субботин // Международный конгресс АПК – стратегический ресурс экономического развития государства: Материалы для обсуждения. – СПб.: ООО «ЭФ-Интернэшнл», 2015. С. 9-11.

51. Бюханов, А.Ю. Логико-лингвистическая модель рециклинга органических отходов/ А.Ю. Брюханов, А.В. Спесивцев, А.В. Трифанов, Р. А. Уваров, В.А. Спесивцев// Сб. докладов. XX Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям SCM-2017, 24-26 мая 2017, Санкт-Петербург, 2017. Т2 – С.180-183.

52. Бунин, М.А. Современный космодром России как объект архитектурно-градостроительной деятельности / М.А. Бунин, А.В. Спесивцев, К.С. Щербуль, Т.В. Алимбиева // Современные направления развития технологии, организации и экономики строительства //Сборник научных трудов участников межвузовского научно-практического семинара (28 апреля 2016)/под общей редакцией доктора технических наук, профессора Бирюкова А.Н. – СПб: ВИ(ИТ) ВА МТО, 2016 – С.44-47.

53. Введение в теорию живучести вычислительных систем./ А.Г. Додонов, М.Г. Кузнецов, Е.С. Горобчик. Отв. ред. В.А. Гуляев, АН УССР. Ин-т пробл. регистрации информации. – Киев: Наук. думка, 1990. – 184 с.

54. Вентцель, Е.С. Прикладные задачи теории вероятностей / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Радио и связь, 1983. – 416 с.

55. Веселая, Г.Н. О применении многомерного регрессионного анализа при исследовании технологических процессов / Г.Н. Веселая // Заводская лаборатория, 1966. – №.3– С. 327-329.

56. Воробьев, Ю.Л. Основы формирования и реализации государственной политики в области снижения рисков чрезвычайных ситуаций /, Ю.Л. Воробьев.– М.: Деловой экспресс, 2000. – 241-4347 с.

57. Военная системотехника и системный анализ: Учебник / Под ред. Б.В.Соколова. – СПб.: ВИКУ им. А.Ф. Можайского, 1999. – 284с.

58. Гаазе-Рапопорт, М.Г. Структура исследований в области искусственного интеллекта / М.Г. Гаазе-Рапопорт, Д.А. Поспелов //Толковый словарь по искусственному интеллекту / Авторы-составители А.Н. Аверкин, М.Г. Гаазе-Рапопорт, Д.А. Поспелов. – М.: Радио и связь, 1992. – С. 5 – 20.
59. Гаврилова, Т.А. Базы знаний интеллектуальных систем/ Т.А. Гаврилова, В.Ф. Хорошевский . – Изд. ПИТЕР, 2000. – 382 с.
60. Георгиев, В.О. Модели представления знаний предметных областей диалоговых систем / В.О. Георгиев // Изв. АН. Техн. кибернетика, 1995. – №5. – С. 56 – 61.
61. Геловани, В.А. Методологические вопросы построения экспертных интеллектуальных систем / В.А. Геловани, О.В. Ковригин, Н.Д. Смолянинов // Системные исследования. Методологические проблемы: Ежегодник. – М: Наука, 1983. – С. 15 – 29.
62. Гвоздик, А.А. Решение нечетких уравнений / А.А. Гвоздик // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1984. – №5. – С. 176 – 183.
63. Гольдштейн, С.Л. Введение в системологию и системотехнику / С.Л. Гольдштейн, Т.Я. Ткаченко. – Екатеринбург: ИРРО, 1994. – 198с.
64. Гольжачаны, М. Б. Некоторые проблемы изучения адекватности нечетких моделей / М. Б.Гольжачаны , Е. Б. Кишка, М. С. Стахович // Нечеткие множества и теория возможностей. – М.: Радио и связь, 1986. – С.93 – 98.
65. ГОСТ 20911 - 89 Техническая диагностика. Термины и определения
66. Гула, Д.Н. Оценивание состояния металлооблицовки стартовых сооружений ракетно-космических комплексов на основе логико-лингвистических моделей / Д.Н. Гула, А.В. Спесивцев, А.В. Вагин // Проблемы управления рисками в техносфере, №1[41], 2017. С. 26-34.
67. Дайманд И.Н. Семантические сети на базовой онтологии / И.Н. Дайманд, А.В. Спесивцев // Сб. докладов. XVI Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям SCM-2013, 23-25 мая 2013, Санкт-Петербург, 2013, Т.1. – С.76-81.

68. Джефферс, Дж. Введение в системный анализ: применение в экологии / Дж. Джефферс. – М.: Мир, 1981. – 202 с.
69. Динер, И.Я. Исследование операций / И.Я. Динер. – Л.: ВМОЛГА, 1969. – 435 с.
70. Добановский, С.А. Системы автоматического управления с реконфигурацией / С.А. Добановский, Н.А. Озерянный // Измерение, контроль, автоматизация. – 1990. – №4(76). – С.62-80.
71. Дмитриев, В.Д. Алгоритмы МГУА на размытых множествах Заде / В.Д. Дмитриев // Автоматика, 1970. – № 4. – 38 – 46.
72. Дмитриев, А.К. Идентификация и техническая диагностика / А.К. Дмитриев, Р.М. Юсупов М. – МО СССР, 1987. – 521 с.
73. Дмитриев, А.К. Основы теории построения и контроля сложных систем / А.К. Дмитриев, И.А. Мальцев – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 192 с.
74. Добров, Г.М. Экспертные оценки в научно-техническом прогнозировании / Г.М. Добров, Ю.В. Ершов, Е.И. Левин, Л.П. Смирнов. – Киев: Наукова Думка, 1974. – 234 с.
75. Добромыслов, А.Н. Оценка надежности зданий и сооружений по внешним признакам / А.Н. Добромыслов. – М.: Издательство АСВ, 2004. – 72 с.
76. Дроздов, А.В. Формализация экспертной информации при логико-лингвистическом описании сложных систем / А.В. Дроздов, А.В. Спесивцев // Изв. РАН. Техническая кибернетика. – 1994. – № 2. – С.89-96.
77. Дроздов, А.В. Определение нечеткой метрики на множестве нечетких чисел (LR)-типа / А.В. Дроздов, А.В. Спесивцев, И.Т. Кимяев – Деп. ВИНТИ №2184 – В-95, 1995. – 21 с.
78. Дроздов, А.В. Обобщение расширенных арифметических операций / / А.В. Дроздов, А.В. Спесивцев, И.Т. Кимяев. – Деп. ВИНТИ № 2185. – В-95, 1995. – 28 с.
79. Дроздов, А.В. Построение АСУТП окислительного обжига в кипящем слое / А.В. Дроздов, А.В. Спесивцев, И.Т. Кимяев . – Деп. ВИНТИ № 2186. – В-95, 1995. – 26 с.

80. Дубов, Ю.А. Многокритериальные модели формирования и выбора вариантов систем / Ю.А. Дубов, С.Н. Травкин, В.Н. Якимец. – М.: Наука, 1986. – 295 с.
81. Дюбуа, Д., Прад А. Теория возможностей. Приложения к представлению знаний в информатике / Д. Дюбуа, А. Прад. – М.: Радио и связь, 1990. – 280с.
82. Евлапов, В.Г. Экспертные оценки в управлении / В.Г. Евлапов, В.А. Кутузов. – М.: Экономика, 1978. – 133 с.
83. Егоров, А.Е. Исследование устройств и систем автоматики методом планированного эксперимента / А.Е. Егоров, Г.Н. Азаров, А.В. Коваль. – Харьков.: Вища школа, 1986. – 240с.
84. Жук, К.Д. Исследование структур и моделирование логико-динамических систем / К.Д. Жук, А.А. Тимченко, Т.И. Доленко. – Киев: Наук. думка, 1975. – 199 с.
85. Заде, Л.А. Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решений / Л.А. Заде // Математика сегодня. – М.: Знание, 1974. – С. 5 – 49.
86. Заде, Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л.А. Заде. – М.: Мир, 1976. – 162 с.
87. Захаров, В.Н. Нечеткие модели интеллектуальных промышленных регуляторов и систем управления. IV Имитационное моделирование / В.Н. Захаров, С.В. Ульянов. // Изв. АН. Техн. Кибернетика. – 1994. – N5. – С. 168 – 210.
88. Зеленцов, В.А. Комбинированный метод многокритериального анализа критичности отказов элементов сложных объектов / В.А. Зеленцов, Е.А. Копытов, А.Н. Павлов. // 10-я Международная конференция “Reliability and Statistics in Transportation and Communication” (RelStat’10), 20–23 октября 2010, Рига, Латвия, ISBN 978-9984-818-34-4. – Рига: Transport and Telecommunication Institute, 2010. – С. 353-360.

89. Зеленцов, В.А. Многокритериальный анализ влияния отдельных элементов на работоспособность сложной системы / В.А. Зеленцов, А.Н. Павлов // Информационно-управляющие системы. – 2010. – №6 (49). – С.7 – 12.
90. Земляков, С.Д. Реконфигурация систем управления летательными аппаратами при отказах / С.Д. Земляков, В.Ю. Рутковский, А.В. Силаев // Автоматика и телемеханика. – 1996. – №2. – С.3-20.
91. Ивахненко, А.Г., Юрачковский Ю.П. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным / А.Г. Ивахненко, Ю.П. Юрачковский. – М.: Радио и связь, 1987. –120 с.
92. Илюнин, О.К. О критериях адекватности математических моделей / О.К. Илюнин // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – Харьков. 1980. – Вып. 54. – С. 56 – 62.
93. Инструкция по эксплуатации железобетонных труб и газоходов на тепловых электростанциях. – М.: СЦНТИ ОРГРЭС, 1970. – 80с.
94. Калинин, В.Н. Теория систем и управления. Структурно-математический подход / В.Н. Калинин, Б.А. Резников. – Л.: ВИКИ им. А.Ф. Можайского, 1978. – 417 с.
95. Калинин, В.Н. Теория систем и оптимального управления. Ч.1. Основные понятия, математические модели и методы анализа систем / В.Н. Калинин, Б.А. Резников, Е.Н. Варакин. – Л.: ВИКИ им. А.Ф. Можайского, 1979. – 386 с.
96. Калянов, Г.Н. CASE. Структурный системный анализ / Г.Н. Калянов. – М.: Лори, 1996г. – 241с.
97. Кандрашина, Е. Ю. Представление знаний о времени и пространстве в интеллектуальных системах / Е. Ю. Кандрашина, Л. В. Литвинцева, Д.А. Поспелов. – М.: Наука, 1989. – 256с.
98. Капица, С.П. Синергетика и прогноз будущего / С.П. Капица, С.П. Курдюмов, Г.Г. Малинецкий. – М.: Наука, 1997. – 352 с.
99. Кардашев, И.П. Методика количественной оценки технического состояния спецсооружений /И.П. Кардашев, А.В. Спесивцев.// Добыча и

переработка руд цветных металлов. Сборник научных трудов. – Норильск. 2000. С.56-63.

100. Карданская, Н.Л. Основы принятия управленческих решений. Учебное пособие / Н.Л. Карданская. – М.: Русская Деловая Литература, 1988. – 288с.

101. Кардашев, И.П. Вопросы эксплуатации и содержания специальных сооружений в условиях Крайнего Севера / И.П. Кардашев // Вестник МАНЭБ – 1999. – №8 (20). – С.9 – 13.

102. Кардашев, И.П. Разработка метода оценки технического состояния и физической устойчивости высокорисковых сооружений с использованием нечетких множеств / И.П. Кардашев // Диссертация ...канд. техн. наук. – Академия гражданской защиты. – Новогорск, 2003. – 196 с.

103. Кисти, Дж. Большие системы: связность, сложность, катастрофы / Дж. Кисти. – М.: Мир, 1982. – 423 с.

104. Кендалл, М. Статистические выводы и связи / М. Кендалл, А. Стюарт – М.: Наука, 1973. – 900 с.

105. Кимяев, И.Т. Исследование закритических областей факторного пространства при управлении процессом с помощью нечеткой управляющей модели / И.Т. Кимяев, З.Г. Салихов, А.В. Спесивцев, А.В. Дроздов // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2001. – № 1. – С. 74 – 77.

106. Кини, Р.Л. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. Пер. с англ.: под ред. И.Ф. Шахнова / Р.Л. Кини, Х. Райфа. – М.: Радио и связь, 1981. – 560с.

107. Косарев, В.А. Методология полнопространственного моделирования сложных экологически опасных металлургических процессов для разработки компьютерных тренинговых систем и обучающих сред. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. М., МГИСиС, 2000.

108. Клир, Дж. Системология: Автоматизация решения системных задач / Дж. Клир. – М.; Радио и связь, 1990. – 425 с

109. Ким, Дж. О. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ / Дж. О. Ким, Ч.У. Мьюллер, У.Р. Кленка, М.С. Олдендерфер, Р.К. Блэшфилд. - М.: Финансы и статистика, 1989. – 215 с.
110. Козлов, В.В. Теоретические основы и методы обоснования ТТЗ при создании и модернизации РКК / В.В. Козлов //Дисс. ... доктора техн. наук. ВКФ имени А.Ф. Можайского. Санкт-Петербург, 2000.
111. Ковалев, А.П. Ракетно-космический комплекс как объект эксплуатации / А.П. Ковалев. – СПб, ВИККА. 1998. – 342 с.
112. Колганов, С.К. Построение в условиях дефицита информации сводных оценок сложных систем / С.К. Колганов, В.В. Корников, П.Г. Попов. – М., 1994. – 80 с.
113. Кравец, В.Г. Основы управления космическими полетами / В.Г. Кравец, В.Е. Любинский. – М.: Машиностроение, 1983. – 224 с.
114. Кофман, А. Введение в теорию нечетких множеств / А. Кофман – М.: Радио и связь, 1982. – 432 с.
115. Крумберг, О.А. Методы организации продукционного представления знаний / О.А. Крумберг, И.П. Федоров, Т.П. Змановский // Методы и системы принятия решений. – Рига: Риж. политехн. Ин-т, 1989. – С. 16 – 28.
116. Кудинов, Ю.И. Нечеткие множества и алгоритмы / Ю.И. Кудинов // Техническая кибернетика. – 1990. – №5. – С. 196 – 216.
117. Кунько, А.Е. Способ неразрушающего контроля технического состояния химических источников тока / А.Е. Кунько, А.В. Спесивцев // Патент РФ 2467436. – Бюлл.№ 32, 20.11.2012.
118. Кунько, А.Е. Оценивание технического состояния химических источников тока на основе неявных экспертных знаний / А.В. Кунько, А.В. Спесивцев // Информация и космос, 2010. – № 4. – С. 42-49.
119. Кунько, А.Е. Алгоритмическое обеспечение методики прогнозирования остаточного ресурса технических объектов на основе метода формализации экспертной информации / А.В. Кунько, А.В. Спесивцев // Наука и

образование. Электронное научно-техническое издание. 77-30569/259313# 01, январь 2012. – 12 с.

120. Лайшев, К.А. Нечеткие множества в эпизоотологическом прогнозировании / К.А. Лайшев, А.В. Спесивцев, И.М. Шалаев. //Актуальные проблемы инфекционной патологии и иммунологии животных/Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. ветеринарии, 2006. – С. 88-89.

121. Ларичев, О.И. Принятие решений как научное направление / О.И. Ларичев // Системн. исследов. Ежегодник-1982. – М., 1982. – С.227-243.

122. Ларичев, О. И. Выявление экспертных знаний / О.И. Ларичев, А. И. Мечитов, Е. М. Мошкович, Е. Фуремс. – М.: Наука, 1989. –296с.

123. Ларичев, О.И., Аналитический обзор процедур решения многокритериальных задач математического программирования / О.И. Ларичев, А.Д. Никифоров. – Экономика и мат методы, 1986. – Т. 22. Вып. 3. – С.508-523.

124. Ларичев, О.И. Теория и методы принятия решений / О.И. Ларичев. – М.: Логос, 2000. – 286 с.

125. Литвак, Б.Г. Экспертная информация: Методы получения и анализа / Б.Г. Литвак. – М.: Радио и связь, 1982. – 184 с.

126. Лазарев, В.Л. Теория энтропийных потенциалов /В.Л. Лазарев – СПб: Изд-во Политехнического ун-та,2012. – 127 с.

127. Лолаев, А.Б. Особенности количественной оценки технического состояния спецсооружений / А.Б. Лолаев, А.В. Спесивцев, И.П. Кардашев // Вестник МАНЭБ. – 1999. – № 8. – 32-36.

128. Лолаев, А.Б. Применение нечетких множеств при моделировании геоэкологических процессов / А.Б. Лолаев, А.В. Спесивцев //Научно-практический семинар «Геокриологические и геоэкологические проблемы строительства в районах Крайнего Севера» 15-17 марта 2001г. – Норильск: НИИ, 2001. –С.124 – 129.

129. Лолаев, А.Б. Применение теории нечетких множеств для оценки и прогноза устойчивости русловой плотины хвостохранилища НМЗ / А.Б. Лолаев, В.В. Бутюгин, А.В. Спесивцев, В.В. Галишевская //Экономика и управление.

Сборник статей. – Норильск: Норильский индустриальный институт, 2002. – 135-143.

130. Лоскутов, А.И. Идентификация и техническое диагностирование бортовой аппаратуры автономных космических аппаратов на основе биективного преобразования множества диагностических признаков / А.И. Лоскутов, В.А. Клыков // Контроль. Диагностика. Научно-технический журнал., 2016. – №4, – С. 57-63.

131. Лукас, В.А. Основы фазы-управления: Учебное пособие / В.А Лукас – Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2000. – 62 с.

132. Лукьянец, А.А. Методология поддержки решений в управлении энергоснабжающими организациями на основе регуляризирующего байесовского подхода / А.А. Лукьянец, С.В. Прокопчина // Некоммерческий фонд развития региональной энергетики. – Томск, 2006. – 280 с.

133. Майданович, О.В. Комплексная автоматизация мониторинга состояния космических средств на основе интеллектуальных информационных технологий / О.В. Майданович, М.Ю. Охтилев, Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов // «Информационные технологии»: Приложение. – М.: Наука, 2011. – №10. – 38 с.

134. Маликов, В.Г. Наземное оборудование ракет / В.Г. Маликов, С.Ф. Комиссарик, А.М. Коротков. – М.: Воениздат, 1971. – 340 с.

135. Международные стандарты ИСО серия 9000 и 10000 на системы качества: версии 1994 г. – М.: Изд-во стандартов, 1995.

136. Мелихов, А.Н. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой / А.Н. Мелихов, Л.С. Бернштейн, С.Я. Коровин. – М.: Наука, 1990. – 272 с.

137. Миллс, Ф. Статистические методы / Ф.Миллс. – М.: Статистика, 1958. – 797 с.

138. Микешина, Л.А. Неявное знание как феномен сознания и познания / Л.А. Микешина // Теория познания. В 4 т. М., 1991. – Т. 2: Социально-культурная природа познания. – М. Наука, 1991.С. – 56 – 68.

139. Микони, С.В. Теория и практика рационального выбора: Монография / С.В. Микони. – М.: Маршрут, 2004. – 463 с.

140. Миронов, А.Н. Теоретические основы и методы многомодельного прогнозирования долговечности сложных военно-технических систем космического назначения / А.Н. Миронов.– Министерство обороны, 2000. – 429 с.

141. Миронов, А. Н., Интегральный подход к прогнозированию показателей долговечности стартового комплекса как сложной системы / А.Н. Миронов, В.Е. Прохорович // Двойные технологии. – 1999. – № 4. – С. 43 – 46.

142. Миронов, А.Н. Оценивание технического состояния сложной системы при нечётко определённом понятии её отказа / А.Н. Миронов, П.Д. Штепан // Материалы отраслевой НТК «Методы оценки технического состояния и надёжности сложных систем». – М.: ЦНТИ «Поиск», 1986. – С.14.

143. Миронов, А.Н. Многомодельное прогнозирование показателей долговечности технологического оборудования стартовых комплексов / А.Н. Миронов // Изв. вузов. Приборостроение. – 2000. – Т.43. – № 8. – С. 39 – 48.

144. Миронов, А.Н. Стратегия эксплуатации стартовых комплексов космического назначения за пределами назначенного ресурса / А.Н. Миронов, И.В. Бармин, В.Е. Прохорович // Полет, 2000. – № 4. – С. 22 – 27.

145. Мицумото, М. Методы управления динамическими процессами на основе нечеткой логики / М. Мицумото. J. Text. Mach. Soc. Jap. – 1990. – V.43. – N7.

146. Можаяев, А.С. Современное состояние и некоторые направления развития логико-вероятностных методов развития анализа систем. Ч.1. / А.С. Можаяев. // Теория и информационная технология моделирования безопасности сложных систем. Вып.1. Ред. И.Я.Рябинин. Препринт 101. – СПб.: ИПМАШ РАН, 1994. – С.23-53.

147. Моисеев, Н.Н. Математические задачи системного анализа / Н.Н. Моисеев. – М.: Наука, 1981. – 328 с.

148. Надежность и эффективность в технике: Справочник: В 10 т./ Ред. Совет: В.С. Авдуевский (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1988. – Т.3: Эффективность технических систем: Под общ. Ред. В.Ф.Уткина, Ю.В. Крючкова. – М.: Машиностроение, 1988.

149. Назаров, А.А. Морфологическое прогнозирование развития военной техники / А.А. Назаров. – МО, 1986. – 252 с.
150. Налимов, В. В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В. В. Налимов, Н. А. Чернова. – М.: Наука, 1965. – 382с.
151. Налимов, В.В. Теория эксперимента / В.В. Налимов. – М.: Наука, 1971. – 208 с.
152. Нариньяни, А.С. Недоопределенность в системе представления и обработки знаний //Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1986, № 5. – С. 3 – 28.
153. Нариньяни, А.С. НЕ-факторы и инженерия знаний: от наивной формализации к естественной прагматике / А.С. Нариньяни // КИИ-94. Сб.научн.трудов. – Рыбинск, 1994. – С. 9-18.
154. Нариньяни, А.С. Модель и алгоритмы: новая парадигма информационной технологии / А.С. Нариньяни // Информационные технологии. – 1977. – №4. – С. 11–16.
155. Нариньяни, А.С. Программирование в ограничениях и недоопределенные модели / А.С. Нариньяни. – Информационные технологии. – 1998. – № 7. – С.13–22.
156. Недосекин, Д.Д. Информационные технологии интеллектуализации измерительных процессов / Д.Д. Недосекин, С.В. Прокопчина, Е.А. Чернавский. – СПб.: Энергоатомиздат, 1995. – 178 с.
157. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта :Под ред. Д. А. Поспелова. – М.: Наука, 1989. – 312с.
158. Новейший философский словарь.
http://mirslovari.com/content_newfilos/znanie-11085.html
159. Новые методы управления сложными системами. – М.: Наука, 2004. – 333 с.
160. Орешкин, С.А. Синтез интеллектуальных автоматизированных систем управления сложными ТП / С.А. Орешкин, А.В. Спесивцев, И.Н. Дайманд, В.Г.

Козловский, В.И. Лазарев // Автоматизация в промышленности. – 2013. – №7. – С. 3-9.

161. Орешкин, С.А. Способ автоматического управления процессом плавки медно-никелевого сульфидного сырья в печи Ванюкова при переработке сульфидной шихты на штейн / С.А. Орешкин, А.В. Спесивцев, В.Г. Козловский, В.И. Лазарев, А.П. Кащук // Патент РФ № 2 571 968. – Бюл. № 36 от 27.12.2015.

162. Орлов, А.И. Прикладная теория измерений. / А.И. Орлов. – Прикл. многомерн. стат. анализ. – М., 1978. – С. 68-138.

163. Орлов, А.И. Теория принятия решений. Учебное пособие / А.И. Орлов. – М.: Издательство «Март», 2004. – 656 с.

164. Орловский, С.А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации / С.А. Орловский. – М.: Наука, 1981. – 256 с.

165. Острейковский, В.А. Старение и прогнозирование ресурса оборудования атомных станций / В.А. Острейковский. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 288 с.

166. Острейковский В.А. Физико – статистические модели надежности элементов ЯЭУ / В.А. Острейковский. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 200 с.

167. Охтилев, .Ю. Основы теории автоматизированного анализа измерительной информации в реальном времени. Синтез системы анализа / М.Ю. Охтилев. – СПб. : ВИКУ им. А.Ф. Можайского, 1999. – . 161 с.

168. Охтилев М.Ю., Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов / М.Ю. Охтилев, Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов. – М.: Наука, 2006. – 410 с.

169. Охтилев М.Ю. Структурно-алгоритмическое распознавание как метод решения задачи оперативного анализа информации о состоянии технических объектов / М.Ю. Охтилев. – СПб.: В ЦИВТИ, 1986. – № В-213. – 32 с.

170. Павлов, А.Н. Методика построения псевдоуниверсальных сверток лингвистических показателей на основе теории планирования экспериментов / А.Н. Павлов //Сб. докладов. XII Международная конференция по мягким вычислениям

и измерениям SCM 23-25 июня 2008, Санкт-Петербург. – Санкт-Петербург: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2008. – Т.2. – С.34 –37.

171. Павлов, А.Н. Методика оценивания технического состояния средств наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами / А.Н. Павлов, С.А. Осипенко //Сборник алгоритмов и программ типовых задач. – СПб.: ВКА им. А.Ф.Можайского, 2008. – Вып. 27. – с. 159-169.

172. Петров, Б.Н. Теория моделей в процессах управления: Термодинамические и информационные аспекты / Б.Н. Петров, И.И. Гольденблат, Г.М. Ульянов и др. – М.: Наука, 1978. – 412 с.

173. Перегудов, Ф.И. Введение в системный анализ / Ф.И. Перегудов, Ф.П. Тарасенко – М.: Высшая школа, 1989. – 367 с.

174. Путов, В.В. Метод измерений фрикционных свойств взлетно-посадочных полос, коррелирующих с характеристиками торможения воздушных судов/ В.В. Путов, А.В. Путов, А.Д. Стоцкая, В.Н. Шелудько, К.В. Игнатъев// Сб. докладов. XIX Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям SCM-2016, 25-27 мая 2016, Санкт-Петербург, 2016. Т1 – С.243-2469.

175. Попов, В.Д. Применение логико-лингвистических моделей для прогнозирования сохранности биопотенциала трав при их консервировании / В.Д. Попов, А.В. Спесивцев, А.И. Сухопаров, В.А. Спесивцев // Сб. докладов. XIX Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям SCM-2016, 25-27 мая 2016, Санкт-Петербург, 2016. Т1 – С.256-259.

176. Попов, В.Д. Свертка многокритериальных экспертных оценок в условиях неопределенности/ В.Д. Попов, А.В. Спесивцев, А.И. Сухопаров, В.А. Спесивцев // Сб. докладов. XX Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям SCM-2017, 24-26 мая 2017, Санкт-Петербург, 2017. Т2 – С.145-150.

177. Попов, Э.В. Экспертные системы / Э.В. Попов. – М.: Наука, 1987. – 224 с.

178. Поспелов, Г.С. О развитии проблем искусственного интеллекта / Г.С. Поспелов // Вестник АН СССР. – 1988. – № 10. – С. 134 – 138.

179. Постон, Е. Теория катастроф и ее приложения / Е. Постон, Я. Стюарт. – М.: Мир, 1980. – 321с.
180. Построение экспертных систем. /Под ред. Ф. Хейеса-Рота, Д. Уотермена, Д. Лената. – М.: Мир, 1987. – 441 с.
181. Представление и использование знаний./ Под ред. Уэно Х., Исудзука И. – М.: Мир, 1989. – 288 с.
182. Прангишвили, И.В. Экспертные системы / И.В. Прангишвили – Измерение, контроль, автоматика, 1988. – № 2 (66). – С. 52 – 66.
183. Прикладные нечеткие системы: Перевод с японского: под ред. Т. Терано, К. Асаи, М. Сугэно. – М.: Мир, 1993. – 368 с.
184. Принятие решений на основе экспертного оценивания. Методическое пособие. – ВИКИ им. А.Ф.Можайского, 1988. – 88 с.
185. Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. IV Междунар. конф. Под ред. В.П. Мясникова, А.А. Кузнецова, В.А. Виттиха. – Самара: Самар. науч. центр РАН, 2002. – 132 с.
186. Проблемы управления сложными динамическими объектами в критических ситуациях на основе знаний: под ред./ Р.А. Бадамшин, Б.Г. Ильясов, Л.Р. Черняховская. – М.: Машиностроение, 2003. – 240 с.
187. Программный пакет STATISTIKA 5_11. – Statsoft, 1999.
188. Прокопчина, С.В. Управление проектами в условиях неопределенности на основе регуляризирующего байесовского подхода / С.В. Прокопчина // IX Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям SCM 2006, Санкт-Петербург. – Санкт-Петербург: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2006. – Т.1. – С.36-50.
189. Проскуряков, Р.М. Интеллектуализация информационно-аналитических подсистем систем оперативного управления распределенными объектами / Р.М. Проскуряков, А.В. Спесивцев, В.И. Халимон, О.В. Проститенко, Н.Ю. Уланова // Записки горного института.– Санкт-Петербург : Изд. СПбГИ (ТУ), 2008. – Т.177. – С.28 – 31.

190. Проскуряков, Р.М. Программный комплекс построения обобщенного показателя физического состояния объектов с распределенными параметрами / Р.М. Проскуряков, А.В. Спесивцев, В.И. Халимон, О.В. Проститенко, Н.Ю. Уланова // Записки горного института.– Санкт-Петербург : Изд. СПбГИ (ТУ), 2008. – Т.177. – С. 40-43.
191. Резников, Б.А. Системный анализ и методы системотехники. Утверждено в качестве учебника / Часть 1. Методология системных исследований. Моделирование сложных систем/ Б.А. Резников. – МО РФ, 2006. – 576 с.
192. Резник, Л.Г. Определение профессиональной пригодности водителей на основе формализации экспертных знаний / Л.Г. Резник, А.В. Спесивцев, Д.С. Федоров // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – М., 2012. – № 11. – С. 36-40.
193. Рузавин, Г.И. Научная теория. Логико-методологический анализ / Г.И. Рузавин – М.: Мысль, 1978. – 212с.
194. Рыжов, В.А. Сетецентризм — управление сложностью. / В.А. Рыжов – Портал «Сайт С.П. Курдюмова», 2014 // (<http://spkurdyumov.ru/networks/setecentrizm-upravlenie-slozhnostyu/>)
195. Рыков, А.С. Методы системного анализа многокритериальной и нечеткой оценки / А.С. Рыков. – М.: Экономика, 1999. – 238 с.
196. Рябинин, И.А. Определение веса и значимости отдельных элементов при оценке надежности сложной системы / И.А. Рябинин, Ю.М. Парфенов // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1978. – № 6. – С.22–32.
197. Саати, Т.Л. Взаимодействия в иерархических системах / Т.Л. Саати // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. – 1979. – № 1 – С. 68 – 84.
198. Салихов, З.Г. Методика построения нечеткой управляющей модели процесса Ванюкова для безокислительной плавки сульфидных концентратов / З.Г. Салихов, А.В. Спесивцев, В.И. Лазарев, Н.И. Мищенко, Е.В. Навильников, И.Т. Кимяев // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2001. – №2. – С. 74 – 81.

199. Салихов, З.Г. Количественная оценка качества управления технологическим агрегатом / З.Г. Салихов, А.В. Спесивцев, Д.А. Москвитин, А.В. Сириченко, И.Е. Зыков // Цветные металлы, 2002. – № 10. – С. 89 – 92.

200. Салихов, З.Г. Способ автоматического управления обжигом никелевого концентрата в печи кипящего слоя / З.Г. Салихов, А.В. Спесивцев, В.А. Дроздов, И.Т. Кимяев, В.Г. Степин. – Патент РФ № 2204616. От 20.05.03.

201. Салихов, З. Г. Об одном методе формализации априорной информации при изучении процесса как объекта управления / З.Г. Салихов, А.В. Спесивцев, А.П. Щетинин, Е.В. Навильников // Известия ВУЗов. Цветная металлургия. – 2004. – №1. – С. 74 – 81.

202. Саркиян, С.А. Анализ и прогноз развития больших технических систем / С.А. Саркиян, В.М. Ахундов, Э.С. Минаев. – М.: Наука, 1983. – 28 с.

203. Сизяков, Н.П. Прогнозирование соответствия характеристик космических средств предъявляемым требованиям на основе использования нечеткой регрессионной модели / Н.П. Сизяков, О.Л. Шестопалова // Информация и космос, № 1, 2010.- С. 83-86.

204. Скориков, Д.В. Обоснование требований к средствам измерений в системах управления риском эксплуатации ракетно-космических комплексов / Д.В. Скориков, И.С. Щербина, А.В. Спесивцев, А.Е. Кунько. // Сб. трудов XXVII Межведомственной научно-технической конференции космодрома «Плесецк» «Научно-технические аспекты совершенствования эксплуатации существующих и испытаний перспективных образцов ракетно-космической техники в современных условиях». – Плесецк, 2010. – С.139-141.

205. Скориков, Д.В. Исследование влияния метрологических характеристик средств измерения на оценку риска эксплуатации сложных технических комплексов / Д.В. Скориков, А.В. Спесивцев, А.В. Вагин // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2010. – №4 – С.48 – 53.

206. Соложенцев, Е.Д. Управление риском и эффективностью в экономике: Логико-вероятностный подход / Е.Д. Соложенцев. – СПб. : Изд-во СПбГУ, 2009. – 259 с.

207. Соколов, Б.В. Комплексное планирование операций и управление структурами в АСУ активными подвижными объектами / Б.В. Соколов. – М.: МО СССР, 1992. – 182 с.

208. Соколов, Б.В. Динамическая модель и алгоритм оптимального планирования комплекса работ на прерывание / Б.В. Соколов, Калинин В // Автоматика и телемеханика. – 1985. – №5. – С. 106-114.

209. Соколов, Б.В. Концептуальная и теоретико-множественная модель управления структурной динамикой космических средств / Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов // Мехатроника. – 2003. №5. – С. 17–25.

210. Соколов, Б.В. Полиmodelьный многокритериальный подход к решению задач исследования эффективности процессов управления сложной технической системой / Б.В. Соколов // Моделирование и Анализ Безопасности и Риска в Сложных Системах: Труды Международной Научной Школы МА БР – 2002 (Санкт-Петербург, 2-5 июля, 2002 г.). – СПб.: Издательство «Бизнес-Пресса», 2002. – С.177 – 182.

211. Соколов, Б.В. Концептуальные основы оценивания и анализа качества моделей и полиmodelьных комплексов/ Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов //Известия РАН. Теория и системы управления, 2004. - № 4 – с.5-16.

212. Спесивцев, А.В. Изучение технологических процессов статистическими методами. Учебное пособие / А.В. Спесивцев.– Норильск: Изд. Красноярского ГУ, 1981. – 40с.

213. Спесивцев, А.В. Интеллектуальные системы управления с нечетким регулятором / А.В. Спесивцев, А.В. Дроздов, И.Т. Кимяев, Е.В. Навильников // Крайний Север'96. Технологии, методы, средства. Естественные и гуманитарные науки. Сб. тезисов докладов регион. научно-технич. конференции. – Норильск: НИИ, 1996. – С.44-45.

214. Спесивцев, А.В. Управляющие модели металлургических процессов с использованием нечетких множеств / А.В. Спесивцев, А.В. Дроздов, С.В. Негрей, Р.Р. Даминов // Цветные металлы. – 1996. №11. – С.66–69.

215. Спесивцев, А.В. Метод оценки состояния сооружений на основе формализации нечеткой информации / А.В. Спесивцев, И.П. Кардашев // Добыча и переработка руд цветных металлов. Сборник научных трудов. – Норильск: НИИ, 2000. – С.75–78.

216. Спесивцев, А.В., Алгоритмы обработки входной информации и управления объектом / А.В. Спесивцев, А.В. Дроздов, И.Т. Кимяев, А.И. Писарев // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-2000. Сборник трудов 13 Международной научной конференции. – Санкт-Петербург: СПбТИ (ТУ), 2000. – С.221–223.

217. Спесивцев, А.В. Моделирование логики принятия решения при управлении процессами / А.В. Спесивцев, Е.В. Навильников, Р.П. Цырульник, Л.И. Тюрина, Н.А. Керина // Экономика и управление. Сборник статей. – Норильск: НИИ, 2002. – 116 – 121.

218. Спесивцев, А.В. Выбор метрики для оценки технического состояния инженерных сооружений / А.В. Спесивцев, И.П. Кардашев, А.В. Петров // Экономика и управление. Сборник статей. – Норильск: НИИ, 2002. – 129–133.

219. Спесивцев, А.В. Прогнозирование отказов и аварийных ситуаций спецсооружений на основе фаззи-моделей / А.В. Спесивцев, И.П. Кардашев, С.Б. Берунов // Экономика и управление. Сборник статей. – Норильск: НИИ, 2002. – 143-149.

220. Спесивцев, А.В. Проблемы превентивного управления безопасностью инженерных сооружений / А.В. Спесивцев, И.П. Кардашев, А.В. Петров, З.М. Гурмач, В.Н. Марокко // Экономика и управление. Сборник статей. – Норильск: НИИ, 2002. – 150-157.

221. Спесивцев, А.В., Оценка вероятности угрозы при телефонном сообщении о предполагаемой ЧС / А.В. Спесивцев, С.Б. Берунов, И.П. Кардашев, Д.Н. Вавилов, В.А. Спесивцев, Д.В. Левин // Экономика и управление. Сборник статей. – Норильск: НИИ, 2002. – 157-165.

222. Спесивцев, А.В. Об одном методе количественной оценки качественных явлений / А.В. Спесивцев, Б.П. Журавлев, М.М. Асыпкина //

Проблемы прочности материалов и сооружений. Труды VI международной научно-технической конференции, СПб, 28-29 января 2004. – СПб.: ПГУПС, 2004. – С.357–363.

223. Спесивцев, А.В. Металлургический процесс как объект изучения: новые концепции, системность, практика / А.В. Спесивцев. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2004. – 307 с.

224. Спесивцев, А.В. Управление рисками чрезвычайных ситуаций на основе формализации экспертной информации / А.В. Спесивцев. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2004. – 238 с.

225. Спесивцев, А.В. Локальные экспертные системы оценки пожарной опасности как настоятельная необходимость / А.В. Спесивцев, А.В. Вагин // Материалы международной научно-практической конференции «Проблемы обеспечения безопасности при чрезвычайных ситуациях». Санкт-Петербург, 27-28 октября 2004 г. – СПб: Санкт-Петербургский институт ГПС МЧС России, 2004. – С.153-157.

226. Спесивцев, А.В. К вопросу об управлении безопасностью и рисками в строительстве / А.В. Спесивцев, И.П. Кардашев, Г.В. Семенов, А.М. Джаман // Экономика и управление. – 2005, №3. – С. 98-103.

227. Спесивцев, А.В. Оценка физического состояния объектов на основе фаззи-моделей / А.В. Спесивцев, // Сб. докладов. «VIII Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям SCM- 2005», 22-14 мая 2005, Санкт-Петербург, 2005. – Санкт-Петербург: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2005. – Т.1. – С.96 – 101.

228. Спесивцев, А.В. Методологические аспекты применения теории и методологии управления рисками на основе экспертной информации / А.В. Спесивцев, В.С. Артамонов // Вестник Санкт-Петербургского института государственной противопожарной службы. – 2005. – №3. – С. 15 –22.

229. Спесивцев, А.В. Мониторинг физического состояния фундаментов зданий и сооружений в нечетком многомерном пространстве / А.В. Спесивцев, Г.В. Семенов, И.П. Кардашев, А.Н. Гусев // Сб. докладов. IX Международная

конференция по мягким вычислениям и измерениям SCM-2006, 25-27 мая 2006, Санкт-Петербург. – Санкт-Петербург: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2006. – Т.2. – С.143 –146.

230. Спесивцев, А.В., Информационная модель нечеткого логического регулятора интеллектуальной системы управления / А.В. Спесивцев, И.Т. Кимяев, Н.Ю.Тропинова, И.Е. Зыков // Сб. докладов. IX Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям SCM-2006, 25-27 мая 2006, Санкт-Петербург. – Санкт-Петербург: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2006. – Т.2. – С.75 – 78.

231. Спесивцев, А.В., Нечеткая модель управления процессом / А.В. Спесивцев, И.Е. Кунько, И.Т. Кимяев, Э.Д. Кадыров // IX Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям SCM-2006, 25-27 мая 2006, Санкт-Петербург. – Санкт-Петербург: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2006. – Т.2. – С.83–87.

232. Спесивцев, А.В. Экспрессная оценка физического состояния фундаментов при реконструкции зданий / А.В. Спесивцев, А.В. Вагин, В.Г. Семенов // Научно-аналитический журнал Вестник Санкт-Петербургского института Государственной противопожарной службы №1[12]-2[13]. – СПб.: ОАО «Издательско-полиграфическое предприятие «Искусство России», 2006. – Стр. 42 – 6.

233. Спесивцев, А.В. Интеллектуальная информационно-диагностическая система оценки выгоды создания дополнительного запаса газа в магистральном газопроводе / А.В. Спесивцев, Ю.В. Тропинов, Н.Ю. Уланова, А.В. Уланов // Сб. докладов. X Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям SCM 2007, Санкт-Петербург, 2007.– СПб.: СПбЭТУ, 2007. – Т.2. – С. 165 – 168.

234. Спесивцев, В.А. Извлечение качественно новой информации из логико-лингвистической модели оценивания вероятности положительного выхода из игровой зависимости / В.А. Спесивцев // Сб. докладов. XVIII Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям SCM-2015, 23-25 мая 2015, Санкт-Петербург, 2015.Т2 – С.307-312.

235. Спесивцев, А.В. Интеллектуальная экспертная система поддержки принятия решений в нечетких условиях конъюнктуры рынка / А.В. Спесивцев, Н.Ю. Уланова, А.В. Вагин // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2008. – №4 – С. 88 – 82.

236. Спесивцев, А.В. Выбор достаточного количества коэффициентов аппроксимирующего полинома в нечетком многомерном факторном пространстве / А.В. Спесивцев // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2008. – Новочеркасск: ЮРГТУ. – №4. – С.33 – 36.

237. Спесивцев, А.В. Информационная модель нечеткого логического регулятора с интеллектуализированной базой знаний / А.В. Спесивцев, И.Т. Кимяев // Управление большими системами. Выпуск 21. – 2008. – М.: ИПУ РАН. – С.165 – 172.

238. Спесивцев, А.В. Прогнозирование повреждаемости элементов конструкции и оборудования стартовых комплексов в условиях интенсивного теплового нагружения / А.В. Спесивцев, В.М. Варварский, Д.В. Садин, Д.А. Чистов // Сб. трудов XXVII Межведомственной научно-технической конференции космодрома «Плесецк» «Научно-технические аспекты совершенствования эксплуатации существующих и испытаний перспективных образцов ракетно-космической техники в современных условиях». – Плесецк, 2010. – С.81 – 83.

239. Спесивцев, А.В. Эксперт как «интеллектуальная измерительно-диагностическая система» / А.В. Спесивцев, Н.Г. Домшенко // Сб. докладов. XIII Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям SCM 23-25 июля 2010, Санкт-Петербург. – Санкт-Петербург: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010. – Т.2. – С.28–34.

240. Спесивцев, А.В. Оценивание информативности полиномиальной модели функциями принадлежности специального типа / А.В. Спесивцев, // Сб. докладов. XIII Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям SCM 23-25 июля 2010, Санкт-Петербург. – Санкт-Петербург: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010 – Т.2. – С.28 – 34.

241. Спесивцев, А.В. Алгоритмическое обеспечение мультимодельного управления качеством конечной продукции с использованием нейро-нечетких моделей / А.В. Спесивцев, Ю.В. Горшков, М.Л. Дудорова, С.В. Абрамов // Сб. докладов. XIII Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям SCM 23-25 июня 2010, Санкт-Петербург. – Санкт-Петербург: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010. – Т.2. – С.28 – 34.

242. Спесивцев, А.В. Обобщение дополнительных арифметических операций над нечеткими числами (LR)-типа / А.В. Спесивцев, А.В. Дроздов, И.Т. Кимяев // Сб. докладов. XIV Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям SCM 23-25 июня 2011, Санкт-Петербург. – Санкт-Петербург: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. – Т.1. – С.251–254.

243. Спесивцев, А.В. Решение нечетких уравнений в пространстве дополнительных арифметических операций / А.В. Спесивцев, А.В. Дроздов // Сб. докладов. XIV Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям SCM23-25 июля 2011, Санкт-Петербург. – Санкт-Петербург: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. – Т.1. – С.247–250.

244. Спесивцев, А.В. Критерий информативности полиномиальной модели на основе функций принадлежности специального типа / А.В. Спесивцев, А.В. Вагин // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2011. – №4. – С.16–23.

245. Спесивцев, А.В. Математизация развития психики женщины на базе фаззи-моделей / А.В. Спесивцев, С.А. Спесивцев, В.А. Спесивцев // Сб. докладов. XV Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям SCM 25-27 июня 2012, Санкт-Петербург. – Санкт-Петербург: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. – Т.2. – С.151 – 154.

246. Спесивцев, А.В. Алгоритмическое обеспечение методики прогнозирования остаточного ресурса технических объектов на основе метода формализации экспертной информации / А.Е. Кунько, А.В. Спесивцев // Наука и образование. Электронное научно-техническое издание. 77-30569/259313#01, январь 2012. <http://technomag.bmstu.ru/doc/259313.html>.

247. Спесивцев, А.В. Применение (LR)-аппроксимации для построения алгоритмов нечеткого вывода / А.В. Спесивцев, А.В. Дроздов // Сб. докладов. XV Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям SCM 25-27 июня 2012, Санкт-Петербург. – Санкт-Петербург: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. – Т.2. – С.148 – 150.

248. Спесивцев, А.В. Повышение степени адекватности логико-лингвистической модели изучаемому явлению путем расширения факторного пространства / А.В. Спесивцев, В.А. Спесивцев, С.А. Спесивцев // Сб. докладов. XVII Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям SCM-2014, 23-25 мая 2014, Санкт-Петербург, 2014. – С.62-65.

249. Спесивцев, А. В. Оценивание степени согласованности функционирования технологического процесса на основе экспертных знаний / А.В. Спесивцев, В.И. Лазарев, И.Н. Дайманд, Д.С. Негрей // Сб. докладов. XV Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям SCM 25-27 июня 2012, Санкт-Петербург. – Санкт-Петербург: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. – Т.1. – С.81–86.

250. Спесивцев, А.В. Структурно-топологическая архитектура экспертной системы оценивания технологического объекта при полимодельном логико-лингвистическом подходе / А.В. Спесивцев, // Сб. докладов. XVIII Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям SCM-2015, 19-21 мая 2015, Санкт-Петербург, 2015. Т1 – С.117-123.

251. Спесивцев, А.В. Семантические сети на базовой онтологии / А.В. Спесивцев, И.Н. Дайманд // Сб. докладов. XVI Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям SCM-2013, 23-25 мая 2013, Санкт-Петербург. – Санкт-Петербург: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. – Т.1. – С.76 – 81.

252. Спесивцев, А.В. Многомодельность как средство преодоления конфликтов управления технологическими процессами с использованием экспертных систем / А.В. Спесивцев, И.Н. Дайманд, Д.С. Негрей, А.В. Филатов // Сб. докладов. XVI Международная конференция по мягким вычислениям и

измерениям SCM-2013, 23-25 мая 2013, Санкт-Петербург. – Санкт-Петербург: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. – Т.2. – С.56–59.

253. Спесивцев, А.В., Создание логико-лингвистических моделей на базе неявных экспертных знаний / А.В. Спесивцев, В.А. Спесивцев // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2014610613 от 15 января 2014.

254. Спесивцев, А.В. Интеллектуальная автоматизированная система управления процессом плавки ПВ-3 Медного завода ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель» / А.В. Спесивцев, И.Н. Дайманд, В.И.Лазарев, А.П. Кащук // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2014. – №5. – С. 64–69.

255. Спесивцев, А.В. Задание нечеткой метрики на множестве нечетких чисел (LR)-типа посредством нечеткой нормы / А.В. Спесивцев, А.В. Дроздов // Сб. докладов. XVII Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям SCM 23-25 мая 2014, Санкт-Петербург. – Санкт-Петербург: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014.– С. 55 – 61.

256. Спесивцев, А.В. Интеллектуальная программа оптимального управления печью Ванюкова / И.Н. Дайманд, А.В. Спесивцев, А.В. Филатов, Д.С. Негрей, С.В. Летуновский. // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2014613676 от 02 апреля 2014.

257. Спесивцев, А.В. Метод решения задач психологии личности формализацией экспертных знаний в условиях неопределенности / А.В. Спесивцев, С.А. Спесивцев, В.А. Спесивцев // Сб. докладов. XVIII Международная научно-практическая конференция: «Научное обозрение физико-математических и технических наук в XXI веке», Россия, г. Москва, 25-27.06.2015. – Ежемесячный научный журнал «Prospero», № 6 (18)/2015. – С.43-57.

258. Спесивцев, А.В. Обоснование факторного пространства для моделирования поведения грунтовых оснований сооружений стратегического назначения в криолитозоне / А.В. Спесивцев, Ю.Н. Тиличко // Современные направления развития технологии, организации и экономики строительства //Сборник научных трудов участников межвузовского научно-практического

семинара (28 апреля 2016)/под общей редакцией доктора технических наук, профессора Бирюкова А.Н. – СПб: ВИ(ИТ) ВА МТО, 2016 – С.145-148.

259. Спесивцев, А.В. Мягкие измерения и мягкие вычисления при моделировании состояния сложных объектов на базе экспертных знаний/ В кн. Управление в условиях неопределенности: монография / под общ. ред. проф. С.В. Прокопчиной. // СПб.:Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017, 304 с. – С.217-263.

260. Спицнадель, В. Н. / В. Н. Спицнадель // Основы системного анализа: Учеб. пособие. – СПб.: «Изд. дом «Бизнес-пресса», 2000 г. – 212 с.

261. Султанова, Л.Б. / Неявное знание в развитии математики. Л.Б. Султанова // Дис. ... д-ра филос. наук. Москва, 2005. – 287 с.

262. Теоретические основы и методы оптимизации анализа технического состояния сложных систем /Монография/ В.В. Мышко, А.Н. Кравцов, Е.В. Копкин, В.А. Чикуров// СПб: ВКА м А.Ф. Можайского, 2013. – 303 с.

263. Тиличко, Ю.Н. Оценка воздействия природных и антропогенных рисков на кроилитозону для строительства зданий и сооружений в арктическом регионе / Ю.Н. Тиличко, А.В. Спесивцев, А.В. Вагин // Проблемы управления рисками в техносфере, №2[42], 2017. С. 15-21.

264. Тропинов, Ю.В. Перспективы интеллектуализации баз знаний АСУ газотранспортных систем методом формализации экспертной информации. / Ю.В. Тропинов, А.В. Спесивцев, Н.Ю. Тропинова, Н.Г. Домшенко // IX Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям SCM-2006. Сб. докладов, Санкт-Петербург. – Санкт-Петербург: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2006, Т.2. – С.79–82.

265. Уланова, Н.Ю. Интеллектуализация как путь повышения эффективности принятия решений в условиях неопределенности / Н.Ю. Уланова, А.В. Спесивцев, Ю.В. Тропинов // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки, №4. Новочеркасск: ЮРГТУ, 2007. – С. 47–49.

266. Уланова, Н.Ю. Интеллектуализация системы принятия решений при оперативном управлении магистральным газопроводом / Н.Ю. Уланова, А.В.

Спесивцев, Ю.В. Тропинов // Вестник ИрГТУ, № 2(30). Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. – С.122–128.

267. Ульянов, С.В. Модели квантово-релятивистских нечетких логик в интеллектуальных системах / С.В. Ульянов // Тез. докл. II Всесоюз.конф. по искусственному интеллекту. Минск, 21-24 октября 1990 г. – М.: ВЦ АН СССР, 1990. –Т. 2. – С. 88–93.

268. Управление сложностью. Операционная система бизнеса /Под редакцией Сергея Хромова-Борисова // М: Издательский дом Гребенникова, 2012. – 336 с.

269. Хованов, Н.В. Математические основы теории шкал измерения качества. / Н.В. Хованов. – Л.: ЛГУ, 1982. – 185 с.

270. Хованов, Н. В. Анализ и синтез показателей при информационном дефиците/ Н. В. Хованов –СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та,2011. – 196 с.

271. Червинская, К.Р. Психология извлечения экспертных знаний субъектов труда : диссертация ... доктора психологических наук : 19.00.03 / К. Р. Червинская – Санкт-Петербург, 2010.- 483 с.

272. Шеннон, Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука / Р. Шеннон. – М.: Мир, 1978. – 420 с.

273. Шишков, И.А. Дымовые трубы энергетических установок / И.А. Шишков и др. – М.: Энергия, 1976. – 324 с.

274. Шостак, А.П. Два десятилетия нечеткой топологии: основные идеи, понятия и результаты / А.П. Шостак // Успехи математических наук. – 1989. – Т. 44. – Вып. 6 (270). – с. 93 – 98.

275. Штовба, С.Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику. / С.Д. Штовба. – Киев.: Нукова думка, 1999. – 204 с.

276. Эшби, У.Р. Введение в кибернетику/ Под редакцией В.А. Успенского/ У. Росс Эшби// М.;ИЛ, 1959. – 428 с.

277. Юдин, Д.В. Математические методы управления в условиях неполной информации / Д.В. Юдин – М.: Советское радио,1974. – 400 с.

278. Юсупов, Р.М. Модель безопасности и риска телекоммуникационной системы. / Р.М. Юсупов, А.Ю. Замятин // Моделирование и Анализ Безопасности и Риска в Сложных Системах: Труды Международной Научной Школы МА БР – 2002 (Санкт-Петербург, 2-5 июля, 2002 г.). – СПб.: Издательство «Бизнес-Пресса», 2002. – С. 28–32.
279. Chang, C.I. Fuzzy topological spaces / C.I. Chang // J. Math. Anal. Appl. – 1968. – V.24.
280. Deng, Z. Fuzzy pseudo-metric spaces / Z. Deng, // J. Math. Anal. Appl. – 1982. – V.86.
281. Dubois, D. Operation on fuzzy members / D. Dubois, H. Prade // Int. J. Systems SCI/ – 1978. – V.9. – N6.
282. Dubois, D. Fuzzy Real Algebra: Some Results / D. Dubois, H. Prade // Fuzzy Sets and Systems. 1979. V.2. N 4.
283. Dubois, D. Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications / D. Dubois, H. Prade // New York: Academic. – 1980.
284. Dubois, D. Possibility Theory An approach to Computerized Processing of Uncertainty / D. Dubois, H. Prade // New York: Plenum. – 1988.
285. Eklund, P. Basic notions for fuzzy topology. Part 1 / P. Eklund, W. Gahler // Fuzzy Sets and Systems. – 1988. – V.26; Part 2. – 1988. – V.27.
286. Erceg, M.A. Metric spaces in fuzzy sets theory / M.A. Erceg // J. Math. Anal. Appl. – 1979. – V.69.
287. Goguen, J.A. L-fuzzy sets / J.A. Goguen // J. Math. Anal. Appl. – 1967. – V.18.
288. Hu, Cheng-ming. Fuzzy topological spaces / Cheng-ming Hu // J. Math. Anal. Appl. 1985. V.110.
289. Ignatyev, M. Multi-Model Approach to City Governance in the Face of Uncertainty/ M. Ignatyev, V. Marley, V. Mikhailov, A. Spesivtsev // Digital Transformation and Global Society. First International Conference, DTGS 2016, St. Petersburg, Russia, June 22-24, 2016, Revised Selected Papers, pp. 469-477 <http://dtgs.ifmo.ru/dtgs-2016.html>

290. Kaleva, O. The completion of fuzzy metric spaces / O. Kaleva // J. Math. Anal. Appl. 1985. V.109.
291. Kaleva, O. On fuzzy metric spaces / O. Kaleva, S. Seikkala // Fuzzy Sets and Systems. 1984. V.12.
292. Kickert, W. Applications of fuzzy controller in a warm water plant / W. Kickert, H.R. Van Nauta Lemke // Automatica. 1976. V.12.
293. Kickert, W.J. Analysis of fuzzy logic controllers / W.J. Kickert, E.H. Mamdani // Fuzzy Sets and Systems. –1978. –№1. – P.29-44.
294. Kosko, Bart. Fuzzy thinking / Bart. Kosko // Hyperion, 1993.
295. Kosko, Bart. Neural Networks and Fuzzy Systems / Bart. Kosko // Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1991.
296. Kramosil, I. Fuzzy metric and statical metric spaces / I. Kramosil, J. Michalik // Kybernetika, 1975. V.11, N 5
297. Lolaev, A.B. Forecasting of the technogenic influence on soils properties on the basis of fuzzy models. / A.B. Lolaev, A.V. Spesivtsev, A.V. Drozdov // Proceedings of 2nd International Congress on Environmental Geotechnics, Osaka, JAPAN. – 1996.
298. Lolayev, A.B., Spesivtsev A.V., Spesivtsev, V.V. Modelling of the technogenic salting of the frozen soils. / A.B. Lolayev, A.V. Spesivtsev, V.V. Spesivtsev // Proceedings of International Symposium Engineering Geology and the Environment, Athens, GREECE. – 1997.
299. Lolayev, A.B. Site investigation of tailing dam in permafrost region. / A.B. Lolayev, A.V. Spesivtsev, N.D. Shklyarov, V.V. Spesivtsev, A.G. Osipov, V.K. Panchul, E.E. Kirienko // Proceedings of Geoenvironmental Engineering Conference CONTAMINATED GROUND: FATE of POLLUTANTS and REMEDIATION, Cardiff, UK. – 1997.
300. Lolayev, A.B. Geotechnics of mining, metallurgical wastes and tailing dams in permafrost regions. / A.B. Lolayev, A.V. Spesivtsev, N.D. Shklyarov, V.V. Spesivtsev, V.K. Panchul, E.E. Kirienko / Proceedings of 1st Australia-New Zealand Conference on Environmental Geotechnics GEOENVIRONMENT 97, Meulburne, AUSTRALIA. – 1997.

301. Lolayev, A.B. Fuzzy modelling in environmental geotechnics. / A.B. Lolayev, A.V. Spesivtsev // Proceedings of 3rd International Congress on Environmental Geotechnics, Lisboa, PORTUGAL. – 1998.
302. Lolayev, A.B. Forecasting of the stability of the tailing dam in permafrost region on the basis of fuzzy models. / A.B. Lolayev, A.V. Spesivtsev, V.V. Butyugin, B.S. Pukhtin, V.A. Savchenko // Proceedings of 8th International Congress of International Association of Engineering Geology (IAEG), Vancouver, CANADA. – 1998.
303. Lolayev, A.B. Influence of chemical structure of salts on strengthen characteristics of fine grained soils. / A.B. Lolayev, A.V. Spesivtsev, O.A. Lyalina, T.G. Ryashchenko, V.V. Akulova // Proceedings of 8th International Congress of International Association of Engineering Geology (IAEG), Vancouver, CANADA. – 1998.
304. Lowen, R. A comparison of different compactness notions in fuzzy topological spaces. / R. Lowen // J.Math. Anal. Appl., 1975, V.50.
305. Lowen, R. Fuzzy topological spaces and fuzzy compactness / R. Lowen // J. Math. Anal. Appl. –1976. –V.56.
306. Mamdani, E.H. On the nature of implication in fuzzy logic / E.H. Mamdani, B.S. Sembi // Proc.9th Int.Symp. Multiple-Valued Logics. New York. –1979.
307. Mamdani, E.H. Advances in the linguistic synthesis fuzzy controllers / E.H. Mamdani // Int.J.of Man-Machine Studies, 1976. V.8.
308. Mamdani, E.H. An experiment in linguist synthesis with a fuzzy logic controller / E.H. Mamdani, S. Assilisl // Int.J. of Ma -Machine Studies. – 1975. V.7.
309. Miller G.A. The Magical Namber Seven, Plus of Minus Two // The Psychological Review, 1956, Vol.63 , P. 81-97.
310. Mizumoto, M. Fuzzy controls under various fuzzy reasoning methods / M. Mizumoto // Inf. Sci. –1988. –V.45. –N2.
311. Mizumoto, M. Fuzzy controls under fuzzy reasoning methods / M. Mizumoto // Inf. Sci. –1988. –V.28. –№2.
312. Mizumoto, M. Fuzzy sets of type 2 under algebraic product and algebraic sum / M. Mizumoto, K. Tanaka // Fuzzy Sets and Systems. –1981. – V.5.

313. Mizumoto, M. Some Properties in Fuzzy Sets on Type 2 / M. Mizumoto, K. Tanaka // *Inform, and Control*. 1976. V.51 №5.

314. Nisbett, R.E. Telling more than we can know: verbal reports on mental processes / R.E. Nisbett, T.G. Wilson // *Psychol. Rev.* –1977. –N37.

315. Nishikawa, T. Fuzzy theory: The science of humintuition / T. Nishikawa // *Jap. Comput. Quart.* – 1989. – N79.

316. Sawaragi, T. Tuning knowledge for intelligent fuzzy controller by analysing a history of control operations / T. Sawaragi, O. Katai, S. Iwai // *Trans. Soc. Instrum. and Conf. Eng.* –1990. –v.26. – N8.

317. Spesivtsev, A.V. Fuzzy models of a technical state of engineering structures. / A.V. Spesivtsev, I.P. Kardashev, N.G. Domshenko, A.I. Petrov, N.A. Kerina, G.V. Semenov // Сб. докладов «VIII Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям SCM 2005», Санкт-Петербург. – Санкт-Петербург: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2005. – Т.1. – С.161– 164.

318. Sokolov, B.V. Dynamic models of comprehensive scheduling for ground-based facilities communication with navigation / B.V. Sokolov // 16th IFAC Symp. on automatic control aerospace. June 14-18, 2004. Preprints. Saint Petersburg, 2004. – Vol. 1. – P. 262-267.

319. Sugeno, M. Fuzzy control. / M. Sugeno // *Nikkan Industry Newspaper Corp.* – Tokyo, 1989.

320. Tong, R.M. et all. A critical assessment of truth functional odification and its use in approximate reasoning / R.M. Tong // *Fuzzy Sets and Systems.* – 1982. – V.7.

321. Uvarov, R. Mathematical model and operation modes of drum-type biofrmenter / R. Uvarov, A. Briukhanov, A. Spesivtsev, V. Spesivtsev // *Engineering for Rural Development. 16th International Scientific Conference. Maj 24-26, 2017. Latvia University of Agriculture, Faculty of Engineering. Jelgava, 24.-26.05.2017. Proceedigs, Volume 16. Pp 1006-1011.*

322. Weiss, M.D. Fixed points, separation and induced topologies for furry sets / M.D. Weiss // *J.Math.Anal. Appl.* – 1975. – V.50.

323. Wong, C.K. Fuzzy topology; product and quotient theorems. / C.K. Wong // J.Math.Anal. Appl. – 1974 – V.46.
324. Yager, R.R. On the Lack of Inverses in Fuzzy Arithmetic / R.R. Yager // Fuzzy Sets and Systems. – 1980. – V.4. – N1.
325. Zadeh, L.A. Fuzzy sets / L.A. Zadeh // Information and Control. – 1965. – V.8.
326. Zadeh, L.A. The concept of a linguistic variable and application to approximate reasoning / L.A. Zadeh // Inf. Sci. – 1975. – V.8, 9.
327. Zadeh, L.A. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility / L.A. Zadeh // Fuzzy Sets and Systems. – 1978. – V.1.
328. Zadeh, L.A. Toward perceptions-based theory of probabilistic reasoning with imprecise probabilities. / L.A. Zadeh // Сб. докладов. VI Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям SCM 25-27 июля 2003, Санкт-Петербург. – Санкт-Петербург: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2003. – Т.1. – С. 69–75.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ДОКАЗАТЕЛЬСТВА ТОЖДЕСТВЕННОСТИ НОВЫХ ФОРМ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ НЕЧЕТКИХ ЧИСЕЛ (LR)-ТИПА И АРИФМЕТИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ НАД НИМИ

В Приложении 1 сохранена нумерация формул соответствующих глав.

П.1.1 Доказательства тождественности арифметических операций над нечеткими числами (LR)-типа при симметризированной форме их представления

Представление расширенных арифметических операций в форме, нечувствительной к знаку нечетких чисел (НЧ).

Для НЧ $A = (a, \alpha, \beta)$ и $B = (b, \gamma, \delta)$ по (2.33) и (2.34) найдем, опуская скобки при $d(A)$, $\Delta(A)$, значения

$$\alpha = dA - \Delta A, \beta = dA + \Delta A, \quad (**)$$

$$\gamma = dB - \Delta B, \delta = dB + \Delta B.$$

Сложение

Докажем (2.36),

$$A \oplus B = (a + b, dA + dB, \Delta A + \Delta B).$$

Согласно (2.4) с учетом (***) и определений 2-2 и 2-3 получим

$$\begin{aligned} A \oplus B &= (a + b, \alpha + \gamma, \beta + \delta) = \\ &= (a + b, dA - \Delta A + dB - \Delta B, dA + \Delta A + dB + \Delta B) = \\ &= (a + b, \frac{1}{2} (dA - \Delta A + dB - \Delta B + dA + \Delta A + dB + \Delta B), \\ &\frac{1}{2} (dA + \Delta A + dB + \Delta B - dA + \Delta A - dB + \Delta B)) = \\ &= (a + b, dA + dB, \Delta A + \Delta B). \end{aligned}$$

2. Вычитание

По (2.37)

$$A \ominus B = (a - b, dA + dB, \Delta A - \Delta B).$$

Согласно (2.5) с учетом (**) и определений 2-2 и 2-3 получим

$$\begin{aligned}
 A \ominus B &= (a - b, \alpha + \delta, \beta + \gamma) = \\
 &= (a - b, dA - \Delta A + dB + \Delta B, dA + \Delta A + dB - \Delta B) = \\
 &= (a - b, \frac{1}{2} (dA - \Delta A + dB + \Delta B + dA + \Delta A + dB - \Delta B), \\
 &\frac{1}{2} (dA + \Delta A + dB - \Delta B - dA + \Delta A - dB - \Delta B)) = \\
 &= (a - b, dA + dB, \Delta A - \Delta B).
 \end{aligned}$$

3. Умножение

По (2.38)

$$A \otimes B = (a b, |a| dB + |b| dA, |a| \Delta B + |b| \Delta A).$$

Согласно (2.7) с учетом (**) и определений 2-2 и 2-3 получим

$$\begin{aligned}
 A \otimes B &= (a b, a \gamma + b \alpha, a \delta + b \beta) = \\
 &(a b, |a| (dB - \Delta B) + |b| (dA - \Delta A), |a| (dB + \Delta B) + |b| (dA + \Delta A)) = \\
 &= (a b, \frac{1}{2} (|a| (dB - \Delta B + dB + \Delta B) + |b| (dA - \Delta A + dA + \Delta A)), \\
 &\frac{1}{2} (|a| (dB + \Delta B + dB - \Delta B) + |b| (dA + \Delta A - dA + \Delta A))) = \\
 &= (a b, |a| dB + |b| dA, |a| \Delta B + |b| \Delta A).
 \end{aligned}$$

4. Деление

По (2.39)

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

Согласно (2.11) с учетом (**) и определений 2-2 и 2-3 получим

$$\begin{aligned}
 A \oslash B &= \left(\frac{a}{b}, \frac{a\delta + b\alpha}{b^2}, \frac{a\gamma + b\beta}{b^2} \right) = \\
 &= \left(\frac{a}{b}, \frac{1}{b^2} (|a| (dB + \Delta B) + |b| (dA - \Delta A)), \right. \\
 &\left. \frac{1}{b^2} (|a| (dB - \Delta B) + |b| (dA + \Delta A)) \right) =
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left(\frac{a}{b}, \frac{1}{2} \frac{1}{b^2} (|a|(dB + \Delta B) + |b|(dA - \Delta A) + |a|(dB - \Delta B) + |b|(dA + \Delta A)), \right. \\
& \left. \frac{1}{2} \frac{1}{b^2} (|a|(dB - \Delta B) + |b|(dA + \Delta A) - |a|(dB + \Delta B) - |b|(dA - \Delta A)) \right) = \\
& = \left(\frac{a}{b}, \frac{|a|d(B) + |b|d(A)}{b^2}, \frac{|b|\Delta A - |a|\Delta B}{b^2} \right).
\end{aligned}$$

П1.2 Обобщение определения дополнительных операций над нечеткими числами

Используя (2.47), введем дополнительные арифметические операции для выражений (2.4) - (2.11). Для нечетких чисел A, B, C $\mu_A, \mu_B, \mu_C \in F(\mathbb{R})$, имеющих такие носители, что $\forall x \in s, x > 0$, они примут следующий вид.

1. Дополнительное сложение

По (2.62)

$$A \oplus_{\text{дон}} B = (a + b, d(A) - d(B), \Delta(A) + \Delta(B)).$$

Согласно определениям (2.47) и (2.37) получим

$$\begin{aligned}
(A \oplus_{\text{дон}} B) \ominus B &= (a + b, dA - dB, \Delta A + \Delta B) \ominus (b, dB, \Delta B) = \\
&= (a + b - b, dA - dB + dB, \Delta A + \Delta B - \Delta B) = (a, dA, \Delta A) = A.
\end{aligned}$$

2. Дополнительное вычитание

По (2.62a)

$$A \ominus_{\text{дон}} B = (a - b, d(A) - d(B), \Delta(A) - \Delta(B)).$$

Согласно определениям (2.47) и (2.36) получим

$$\begin{aligned}
(A \ominus_{\text{дон}} B) \oplus B &= (a - b, dA - dB, \Delta A - \Delta B) \oplus (b, dB, \Delta B) = \\
&= (a - b + b, dA - dB + dB, \Delta A - \Delta B + \Delta B) = (a, dA, \Delta A) = A.
\end{aligned}$$

3. Дополнительное умножение

По (2.63)

$$A \otimes_{\text{дон}} B = (ab, |b|d(A) - |a|d(B), |a|\Delta(B) + |b|\Delta(A)).$$

Согласно (2.47) выполним действия с учетом (2.39)

$$(A \otimes_{\text{дон}} B) \oslash B = A$$

$$\begin{aligned}
& (a, dA, \Delta A) \otimes_{\text{дон}} (b, dB, \Delta B) \ominus ((b, dB, \Delta B) = \\
& (ab, b dA - a dB, a\Delta B + b \Delta A) \ominus (b, dB, \Delta B) = \\
& = \left(\frac{ab}{b}, \frac{1}{b^2} (ab dB + b(b dA - a dB)), \frac{1}{b^2} (b(a \Delta B - b \Delta A) - ab \Delta B)\right) = \\
& = (a, dA, \Delta A) = A.
\end{aligned}$$

4. Дополнительное деление

По (2.64)

$$\forall \delta_A, \delta_B, \gamma_A, \gamma_B : \frac{\gamma_A}{\delta_A} \geq \frac{\gamma_B}{\delta_B}$$

$$A \oslash_{\text{дон}} B = \left(\frac{a}{b}, \frac{|b|d(A) - |a|d(B)}{b^2}, \frac{|b|\Delta(A) - |a|\Delta(B)}{b^2} \right).$$

Согласно (2.47) выполним действия с учетом (2.38)

$$\begin{aligned}
& (A \oslash_{\text{дон}} B) \otimes B = A \\
& (a, dA, \Delta A) \oslash_{\text{дон}} (b, dB, \Delta B) \otimes (b, dB, \Delta B) = \\
& = \left(\frac{a}{b}, \frac{1}{b^2} (b dA - a dB), \frac{1}{b^2} (b \Delta A - a \Delta B)\right) \otimes (b, dB, \Delta B) = \\
& = \left(\frac{a}{b} b, \frac{a}{b} dB + b \frac{1}{b^2} (b dA - a dB), \frac{a}{b} \Delta B + b \frac{1}{b^2} (b \Delta A - a \Delta B)\right) = \\
& = (a, dA, \Delta A) = A.
\end{aligned}$$

П.1.3 Исследование свойств дополнительных арифметических операций

Убедимся в справедливости неравенства (2.52)

$$(A \oplus_{\text{дон}} B) \oplus_{\text{дон}} C \neq A \oplus_{\text{дон}} (B \oplus_{\text{дон}} C),$$

выполнив действия по (2.62) слева:

$$\begin{aligned}
& (a + b, dA - dB, \Delta A + \Delta B) \oplus_{\text{дон}} (c, dC, \Delta C) = \\
& = (a + b + c, dA - dB - dC, \Delta A + \Delta B + \Delta C)
\end{aligned}$$

и справа

$$(a, dA, \Delta A) \oplus_{\text{дон}} (b + c, dB - dC, \Delta B + \Delta C) =$$

$$= (a + b + c, dA - dB + dC, \Delta A + \Delta B + \Delta C).$$

Убедимся в справедливости неравенства (2.53)

$$(A \otimes_{\text{дон}} B) \otimes_{\text{дон}} C \neq A \otimes_{\text{дон}} (B \otimes_{\text{дон}} C),$$

выполнив действия по (2.63) в левой его части

$$\begin{aligned} A \otimes_{\text{дон}} B &= (ab, |b|d(A) - |a|d(B), |a|\Delta(B) + |b|\Delta(A)), \\ (ab, |b|dA - |a|dB, |a|\Delta B + |b|\Delta A) \otimes_{\text{дон}} (c, dC, \Delta C) &= \\ &= (abc, |c|(|b|dA - |a|dB) - ab dC, ab \Delta C + |c|(|a|\Delta B + |b|\Delta A)) \end{aligned}$$

и правой

$$\begin{aligned} (a, dA, \Delta A) \oplus_{\text{дон}} (bc, |c|dB - |b|dC, |b|\Delta C + |c|\Delta B) &= \\ &= (abc, |c|(|b|dA - |a|dB) + ab dC, ab \Delta C + |c|(|a|\Delta B + |b|\Delta A)). \end{aligned}$$

Равенство (2.54)

$$A \ominus_{\text{дон}} 0 = A \quad \text{проверим по (2.62a):}$$

$$(a, dA, \Delta A) \ominus_{\text{дон}} (0, 0, 0) = (a + 0, dA - 0, \Delta A - 0) = (a, dA, \Delta A) = A.$$

Равенство (2.55)

$$A \oslash_{\text{дон}} 1 = A \quad \text{проверим по (2.64):}$$

$$\begin{aligned} (a, dA, \Delta A) \oslash_{\text{дон}} (1, 0, 0) &= \left(\frac{a}{1}, \frac{1}{1^2} (1 * dA - a * 0), \frac{1}{1^2} (1 * \Delta A - a * 0)\right) = \\ &= (a, dA, \Delta A) = A. \end{aligned}$$

Равенство (2.56)

$$A \ominus_{\text{дон}} A = 0 \quad \text{проверим по (2.62a):}$$

$$(a, dA, \Delta A) \ominus_{\text{дон}} (a, dA, \Delta A) = (a - a, dA - dA, \Delta A - \Delta A) = (0, 0, 0) = 0.$$

Равенство (2.57)

$$A \oslash_{\text{дон}} A = 1 \quad \text{проверим по (2.64):}$$

$$\begin{aligned} (a, dA, \Delta A) \oslash_{\text{дон}} (a, dA, \Delta A) &= \\ \left(\frac{a}{a}, \frac{1}{a^2} (|a|dA - |a|dA), \frac{1}{a^2} (|a|\Delta A - |a|\Delta A)\right) &= (1, 0, 0) = 1. \end{aligned}$$

Равенство (2.58)

$$(A \oplus B) \ominus_{\text{don}} A = B$$

проверим по (2.36) и (2.62а):

$$\begin{aligned} (a + b, dA + dB, \Delta A + \ominus \Delta B) \ominus_{\text{don}}(a, dA, \Delta A) &= \\ &= (a + b - a, dA + dB - dA, \Delta A + \Delta B - \Delta A) = (b, dB, \Delta B) = B. \end{aligned}$$

Равенство (2.59)

$$(A \otimes B) \ominus_{\text{don}} A = B \quad \text{проверим по (2.38) и (2.64):}$$

$$\begin{aligned} (ab, |b| dA + |a| dB, |a| \Delta B + |b| \Delta A) \ominus_{\text{don}}(a, dA, \Delta A) &= \\ \left(\frac{ab}{a}, \frac{1}{a^2} (|a| (|b| dA + |a| dB) - |a| |b| dA), \frac{1}{a^2} (|a| (|b| \Delta A + |a| \Delta B) - \right. & \\ \left. - |a| |b| \Delta A)\right) &= (b, dB, \Delta B) = B. \end{aligned}$$

Равенство (2.60)

$$(A \ominus B) \otimes_{\text{don}} B = A$$

проверим по (2.39) и (2.63):

$$\begin{aligned} \left(\frac{a}{b}, \frac{1}{b^2} (|a| dB + |b| dA), \frac{1}{b^2} (|b| \Delta A - |a| \Delta B)\right) \otimes_{\text{don}}(b, dB, \Delta B) &= \\ = \left(\frac{a}{b} b, \frac{1}{b^2} b (|a| dB + |b| dA) - \frac{a}{b} dB, \frac{a}{b} \Delta B + \frac{1}{b^2} b (|b| \Delta A - |a| \Delta B)\right) &= \\ = (a, dA, \Delta A) = A. \end{aligned}$$

Равенство (2.61)

$$A \otimes_{\text{don}} (-1) = -A \quad \text{проверим по (2.63):}$$

$$\begin{aligned} (a, dA, \Delta A) \otimes_{\text{don}}(-1, 0, 0) &= (-a, |-1| \cdot dA - a \cdot 0, a \cdot 0 + |-1| \cdot \Delta A) = \\ &= (-a, dA, \Delta A) = -A. \end{aligned}$$

Аналогично (2.61а)

$$(-1) \otimes_{\text{don}} A \neq -A.$$

$$\begin{aligned} (-1, 0, 0) \otimes_{\text{don}}(a, dA, \Delta A) &= (-a, a \cdot 0 - |-1| \cdot dA, |-1| \cdot \Delta A + a \cdot 0) = \\ &= (-a, -dA, \Delta A) \neq -A. \end{aligned}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. СТРУКТУРНО-ТОПОЛОГИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СЛОЖНОГО ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА

П2.1 Диаграмма связи вычислительной модели для распознавания состояния СлО

Структурный анализ сложных производственных процессов должен проводиться как в узком, так и в широком смыслах [191]. При этом структурный анализ в широком смысле предусматривает осуществление достаточно полного системного модельного исследования технической, технологической и организационной сторон производственного процесса в целом, а в узком смысле – структурный анализ каждой из сторон в отдельности.

При моделировании функционирования СлО в целом приходится в рамках единой экспертной системы описывать как функционирование производственного агрегата, так и технологический процесс, реализуемый в данном агрегате.

При таком подходе на передний план выступает разработка методологии, требующая сочетания (единства) анализа и синтеза при оценивании состояния СлО как целостных образований, состоящих из взаимосвязанных частей и обладающих новыми свойствами по сравнению со свойствами этих частей. Наиболее характерной чертой периода создания такой экспертной системы является применение системно-кибернетического подхода с привлечением знаний из различных разделов наук [191].

В фундаментальном труде [168] поставлена и решена проблема потоково-многоуровневого (ПМ) распознавания технического состояния СлО. Основным методологическим принципом выступает переход от конструкций метрических пространств к конструкциям более общего порядка – **топологическим пространствам**. Поэтому данный подраздел изложен в интерпретации авторов [168], в котором показана фактическая реализация *наиболее общего подхода к решению многоуровневого распознавания состояния сложных технологических процессов, объектов или явлений в любой отрасли*. В качестве примера ниже демонстрируется структурно-топологическое описание состояния СлО –

функционирования плавильного агрегата большой единичной мощности и осуществляемого в нем технологического (пирометаллургического) процесса.

В фундаментальном труде [168] поставлена и решена проблема потоково-многоуровневого (ПМ) распознавания технического состояния СЛО. Основным методологическим принципом выступает переход от конструкций метрических пространств к конструкциям более общего порядка – топологическим пространствам. Поэтому данный подраздел изложен в интерпретации авторов [168].

В окончательном варианте диаграмма связи для ПМ распознавания принимает вид, как показано на рисунке П.2.1. Здесь соответствующие множества вместе со своими топологиями τ составляют топологические пространства.

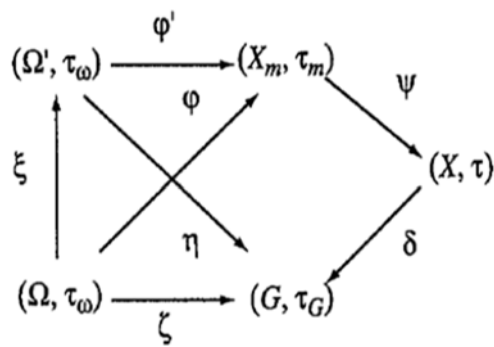


Рисунок П.2.1 - Диаграмма связи для ПМ распознавания

Введены следующие базовые множества и отношения для анализа диаграммы.

$(\Omega, \tau_\omega) = \{\omega\}$ – множество технических состояний, способных проявляться на СЛО.

$(\Omega', \tau_{\omega'}) \subset (\Omega, \tau_\omega)$ – множество технических состояний, являющееся обучающим множеством (для систем распознавания с обучением).

$(X, \tau) = \{x\}$ – множество (словарь) признаков, формирующее при распознавании некоторое признаковое пространство.

$(X_m, \tau_m) = \{x_m\}$ – множество значений измеряемых параметров СТО.

$(G, \tau_G) = \{g\}$ – множество решений (управляющих воздействий) соответствующей надсистемы для рассматриваемой системы распознавания – системы управления, функционирующей совместно с СТО.

Для правильного выбора стратегии решения синтеза структуры вычислительной модели определены связи между введенными множествами (рис.2).

$\varphi: (\Omega, \tau_\omega) \rightarrow (X_m, \tau_m)$ – отношение наблюдения или измерения – отображение, ставящее в соответствие каждому элементу $\omega \in \Omega$ его образ (точку) в измеряемом пространстве (X_m, τ_m) .

$\zeta: (\Omega, \tau_\omega) \rightarrow (G, \tau_G)$ – отношение классификации – целевое отношение при синтезе системы распознавания состояния СТО.

$\psi: (X_m, \tau_m) \rightarrow (X, \tau)$ – отображение вычислимости или вычисления, которое каждому элементу (точке) измеряемого пространства однозначно сопоставляет элемент (точку) пространства параметров состояния СТО. Это сопоставление задается посредством вычисления значений недостающих вычисляемых параметров состояний.

$\delta: (X, \tau) \rightarrow (G, \tau_G)$ – отображение интерпретации, которое каждой области в пространстве параметров состояний (X, τ) сопоставляет элемент пространства классов (G, τ_G) .

Тогда задача распознавания состояния СТО формулируется следующим образом [159]:

непосредственным преобразованием измерительной информации по синтезированной схеме программы, обеспечивающей ПМ получение достоверных результатов в реальном масштабе времени, построить потоковое многоуровневое вычисление значений параметров цели анализа X_g , соответствующее отношению классификации ζ , по отнесению предъявленных для распознавания объектов $\omega \in \Omega$ к одному или нескольким классам $g^{opt} \in G$, которые доставляют максимум в выражение для F_d :

$$g^{opt} = \operatorname{argmin} (F_d(X_g)),$$

$$g \in G$$

где F_d – множество параметрических отображений с множеством значений достоверности (правдоподобия)

$$d_{\zeta} \in D_s \in [0, 1] \subset R^+,$$

вычисленных значений множеству X параметров цели

$$X_g \in X_g \subset X : F_d : X_g \rightarrow D_s.$$

Ниже демонстрируется решение поставленной задачи применительно к ПВ.

П2.2 Структурно-топологическое описание ИАСУ ПВ

В данном разделе рассматривается структурно-топологическое описание состояния плавильного агрегата и осуществляющегося в нем пирометаллургического процесса переработки сульфидных материалов для синтеза виртуальной плавильной печи с целью создания алгоритмического обеспечения ИАСУ ПВ [250,252].

Как показывает многолетняя практика [254], управление процессом достаточно успешно осуществляет оператор-технолог, выступающий одновременно в качестве и диагноста, и лица, принимающего решение. Такие действия соответствуют отображению

$$\zeta : (\Omega, \tau_{\omega}) \rightarrow (G, \tau_G)$$

на диаграмме связи (рис.1), что переводит человека в разряд «интеллектуальной информационно-диагностической системы» (ИИДС), осуществляющего распознавание состояния объекта в реальном масштабе времени и вырабатывающего управляющие воздействия [239].

Такое использование «человеческого фактора» не всегда эффективно по целому ряду причин, среди которых можно указать:

- существенно различный стиль ведения процесса операторами-технологами в силу их индивидуального личного опыта;
- наличие противоречивых по целевому назначению факторов;
- переработка нестандартного сырья при необходимости соблюдения жестких норм качества конечных продуктов;

- объективную невозможность измерения некоторых важных характеристик процессов;
- обилие органолептической информации и др.

В объективных условиях существенной неопределенности возникает необходимость создания алгоритмического обеспечения ИАСУ ТП, которое на рис.1.6 (глава 1) с теоретической точки зрения обеспечивается за счет реализации композиции отношений

$$\zeta = \delta \circ \psi \circ \varphi: (\Omega, \tau_{\omega}) \rightarrow (G, \tau_G),$$

а с практической – необходимости создания экспертной системы, реализующей по отдельности и связывающей отображения φ , ψ , δ . Здесь ИАСУ должна выступать в качестве советчика оператору при принятии им решения в различных ситуациях технического состояния ПВ.

При детерминированном подходе обычно считают, что способ реализации отношения измерения

$$\varphi: (\Omega, \tau_{\omega}) \rightarrow (X_m, \tau_m)$$

на производстве достаточно отлажен и получение измеряемой информации не представляет трудностей через АСУ ТП. Однако в случае существенной неопределенности, характерной практически всем промышленным процессам, необходимость эмуляции сигналов для нужд оператора-технолога (или создания тренажера обучения и повышения квалификации операторов) задача не выглядит тривиальной ввиду отсутствия устойчивых функциональных зависимостей между многими показателями информационных каналов по вполне объективным причинам [254]. Поэтому особенно востребованной выступает экспертная информация, извлеченная и формализованная в виде логико-лингвистической модели (глава 4).

Применительно к ПВ в ИАСУ отношение

$$\psi: (X_m, \tau_m) \rightarrow (X, \tau)$$

реализуется как множество схем программ $\mathcal{S}_{\psi} = \{S_{\psi}\}$, правильно вычисляющих значения параметров цели анализа $X_g \subseteq \mathcal{X}_g$. В качестве таковых выступают, в основном, также логико-лингвистические модели.

Таким образом, композиция отношений

$$\psi \circ \varphi: (\Omega, \tau_{\omega}) \rightarrow (X, \tau)$$

фактически задает итоговое соответствие элементов пространства технических состояний (Ω, τ_{ω}) некоторой точке пространства (X, τ) , которое формирует при распознавании некоторое признаковое пространство.

Комплект программ $\mathcal{S}_{\psi} = \{S_{\psi}\}$ тесно увязан с протеканием физико-химических процессов в расплаве, загрузкой, кислородно-воздушным и газовым дутьем, температурой во внутривспечном пространстве, состоянием кессонированных поясов конструкции агрегата и перепадом температур воды на входе и выходе из кессонов, положением управляющих механизмов и еще с множеством других определяемых и неопределяемых технологических переменных, обеспечивающих безопасное и эффективное ведение ПВ, как показано в п. 6.2 (глава 6).

Закрывающее отношение

$$\delta: (X, \tau) \rightarrow (G, \tau_G)$$

каждой области в синтезированном с помощью ИАСУ пространстве параметров состояний (X, τ) сопоставляет элемент пространства классов (G, τ_G) .

В случае ИАСУ ПВ это отображение интерпретации визуально представлено главным окном интерфейса (рисунок 6.12, глава 6), по которому оператор-технолог получает ориентировку как по входным переменным (множество (Ω, τ_{ω})), так и складывающейся ситуации протекания процесса плавления на данный момент времени (множество (G, τ_G)). Сопоставляя всю полученную информацию, оператор вырабатывает управляющее решение: принять предлагаемый ИАСУ сценарий ведения ПВ или вести по своему разумению. В любом случае у него есть возможность визуально отслеживать в количественном виде результат своего решения, что позволяет, с одной стороны, удерживать состояние процесса в допустимых рамках по критическим факторам, а с другой, – в каждый момент времени иметь возможность управлять качеством конечных продуктов как цели производства $F_d: X_g \rightarrow D_s$.

Таким образом, с точки зрения топологии описание ИАСУ ПВ выстроено в полном соответствии с теоретическими исследованиями [168], а использование

экспертной системой разработанной процедуры распознавания в виде ЛЛМ оказывается методологически вполне оправданным и практически подтвержденным фактом внедрения на промышленном предприятии [249-254].

При автоматизации процессов мониторинга состояния СЛО основой представления знаний выступают в значительной мере вычислительные модели вместо алгоритмического описания.

Множество принципов и методов построения таких моделей чрезвычайно богато, что обусловлено разнообразностью как самих СЛО, так решаемых задач мониторинга. В работе [168], как показано выше на рисунке 1, правильному выбору стратегии решения проблем подобного типа способствуют топологические конструкции.

Архитектура ИАСУ ПВ использует только часть топологической конструкции, показанной на рисунке 1.6 (глава 1) по пути

$$(\Omega, \tau_{\omega}) \rightarrow (X_m, \tau_m) \rightarrow (X, \tau) \rightarrow (G, \tau_G).$$

Поскольку в основе синтеза логико-лингвистических моделей используются не данные, а знания и опыт эксперта преимущественно в вербальном виде, то *топологией τ множества знаний по моделированию пирометаллургических процессов выступает базовая онтология [251], образуя тем самым топологическое пространство принципиально нового типа.*

Кроме того, при решении задач мониторинга состояния СЛО приходится сталкиваться с «проклятием размерности» – наличием большого количества элементов предметной области, которые являются значимыми. При этом знания о них «слабо структурированы», а связи отличаются свойствами НЕ-факторов [152-155]. В подобных условиях вопрос выбора метода представления знаний становится тем более актуальным, чем более высокая сложность задачи. С целью решения указанных выше обеих проблем представление знаний происходит путем применения метода «Семантические сети на базовой онтологии» [251] с сохранением всей необходимой семантики каждого значимого элемента предметной области и его функциональность.

Как показала практика использования ИАСУ ПВ, принятая архитектура ее построения по указанному топологическому пути полностью себя оправдала, о чем свидетельствуют промышленное внедрение, подтвержденное актом, и патент РФ.

В заключение рассмотрим оставшуюся часть диаграммы связи для потоково-многоуровневого распознавания (рисунок 1.6) применительно к ПВ.

Путь использования обучающих множеств для достижения конечных результатов

$$(\Omega, \tau_{\omega}) \rightarrow (\Omega', \tau_{\omega}) \rightarrow (G, \tau_G)$$

реализован при управлении качеством штейна на основе нейро-нечетких моделей [241]. Так, для систем распознавания с обучением выбирались множества технических состояний

$$(\Omega', \tau_{\omega}) \subset (\Omega, \tau_{\omega})$$

через отношение обобщения

$$\xi: (\Omega, \tau_{\eta\omega}) \rightarrow (\Omega', \tau_{\omega}),$$

которое позволяет работать не только с обучающим множеством (Ω', τ_{ω}) , но и решать задачи селекции при распознавании [168], например, общепринятым путем построения статистических моделей с последующей проверкой на других выборках из исходного множества (Ω, τ_{ω}) состояний ПВ [249].

Отображение

$$\eta: \Omega' \rightarrow G$$

ставит в соответствие каждому элементу обучающего множества Ω' единственный элемент множества классов – отношение обучения.

Отображение

$$\varphi': \Omega' \rightarrow X$$

является отношением измерения для обучающего множества Ω' .

Так, из массива статистических данных промышленного контроля ПВ по штейну и шлаку за длительный промежуток времени по выборкам достаточно большого объема (200-600 точек) проводилось обучение нейро-нечеткой модели, которая после нескольких шагов обучения показала достаточно приемлемое

приближение прогнозируемых значений к реальным содержаниям конечных продуктов процесса плавки.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ АКМЕОЛОГИИ И ПСИХОЛОГИИ ЛИЧНОСТИ

Во введении указано, что объектом диссертационного исследования являются различные классы материальных и *нематериальных Сло* естественного и *искусственного происхождения*. В качестве доказательности такого утверждения приведены ниже следующие примеры.

П3.1 Описание проблемы

По утверждению выдающегося российского математика Елены Семеновны Вентцель: «Математика не только проникает в ранее чуждые для неё области, «завоёвывает» их – она при этом и сама трансформируется, становится менее формальной, менее ригористичной, меняет свои методологические черты, приближаясь к наукам гуманитарным» [54].

Математические методы пока, к сожалению, не смогли системно охватить такую актуальную науку, как психология. И если в области социальной психологии математизация успешно осуществлена методами статистики [17,18,47,104], то в области индивидуального консультирования по-прежнему наблюдается практически полный вакуум. Кроме того, как показывает практика, широкое использование балльных оценок для фиксации сложных психологических состояний – чаще всего некорректны, а математические операции с баллами показывают полную несостоятельность балльного метода.

На рисунке П.3.1 представлена наша субъективная схема «проникновения» математических методов в область психологии. При этом существенным является условное разделение психологии на психологию личности и социальную психологию.

Психотерапевтическим идеалом в таком случае выступает статистическое сведение всех характеристик личности к средним показателям по выборкам большого объема. По степени близости *индивидуальных характеристик к идеалу*

оценивают психическое состояние человека.



Рисунок П.3.1 – Схема областей использования математических методов в психологии

В социальной психологии активно используется вариант применения «усредненного образа» представителя некой группы личностей в качестве образца, с которым сравнивается живой конкретный человек.

Этот метод, базирующийся на статистике, даёт неплохие результаты при профотборе, когда группу людей нужно по нескольким признакам разделить на подгруппы, а также изучении человека как представителя некоторой общности.

Однако в области *индивидуального консультирования* эти усреднённые показатели не помогают специалисту сориентироваться, а иногда даже заводят консультирование конкретного человека в тупик. В лучшем случае, произвольно выбранная группа параметров, которые изменились под действием консультирования, практически никак не отражаются на достижениях человека в реальной жизни. А может случиться, что достижение среднего «нормального» показателя по одному параметру, существенно ухудшило остальные или даже разбалансировало психику в целом. Дело в том, что выработка статистических моделей целесообразна для изучения некоторых развивающихся тенденций в обществе. Тогда человек со средними показателями выступает как проявление

изучаемой социальной тенденции, выраженной в виде усреднённого «виртуального» человека. Но к одному конкретному представителю даже этого социума весь статистически валидный материал может не иметь ровно никакого отношения. И работать с конкретным человеком на базе статистических моделей – занятие бесперспективное. Вместе с тем, опытный консультант, чувствуя своего клиента, сопереживая ему, понимает, как именно идут у него дела и что стоит прорабатывать дальше для получения необходимого результата в жизни.

Естественно, при таком положении вещей затруднено как воспитание новых поколений грамотных консультантов, так и индивидуальная работа с клиентами. Для действительно эффективной работы консультанту крайне необходим некий математический инструмент измерения результатов и своего труда, и успехов его клиента.

Таким образом, традиционно используемые подходы математизации психологического знания нуждаются в расширении за счёт принципиально новых методов, например, которые в других областях уже доказали свои возможности.

Если считать квалифицированного консультанта в психологии экспертом [239], а его клиента – «сложной системой», то будет вполне допустимым применить инструменты, разработанные в рамках методов исследования сложных систем, к решению задач психологии. В таком случае речь заходит уже о математическом моделировании в психологии. При этом, поскольку для создания модели используются не статистические данные, а квалификация консультанта, то нужна методика извлечения его формальных знаний и опыта, который он накопил в виде профессиональной интуиции. Последнее не поддаётся непосредственной математизации детерминированными методами по объективным причинам, но может быть выявлено в процессе опроса консультанта по разработанной выше (главы 2-4) методике с формализацией его знаний в виде логико-лингвистических моделей.

Лингвистическая составляющая такого подхода дает возможность вести диалог с экспертом на его профессиональном языке в понятном ему факторном

пространстве, а математическая обработка его мнения позволит создать экспертную модель по данному конкретному вопросу.

Именно такой подход к человеку как сложной системе с массой взаимосвязанных факторов позволяет наиболее полно описать его психологические реалии в отдельно взятой области [257].

Ниже рассмотрено решение двух задач психологии, назревших в нашем и мировом обществе: первая – моделирование психологической готовности женщины к созданию семьи, а вторая – проблеме оценивания вероятности положительного выхода из игровой зависимости. В методологическом же плане предлагаемый метод синтеза логико-лингвистических моделей предоставляет возможность вплотную приблизиться к построению, проведению и контролю индивидуальной формы обучения.

П3.2 Моделирование психологической готовности женщины к созданию семьи

Примерно до середины 80-х годов прошлого века государство стояло на стороне женских интересов и семьи, что позволяло формировать условия для массового брака. Современные условия не особенно способствуют развитию института семьи. В результате, особенно в условиях кризиса, наблюдается достаточно ощутимый рост разводов на фоне падения количества браков. Да, действительно, развод перестал быть социальной и психологической катастрофой для супругов, но это не значит, что значительная часть женщин и некоторая часть мужчин не хотят вступать в брак. Причём именно в официальном браке больше нуждаются женщины. И если раньше фактор традиции (когда именно пора вступать в брак) и относительная недоступность внебрачного секса побуждали мужчин к созданию семей, то сегодня положение в корне изменилось.

Переписи показывают, что, как ни парадоксально, растёт разница в количестве женатых мужчин и замужних женщин. Гражданский брак позволяет женщинам гордо сообщать, что они состоят в браке, а их гражданские мужья говорят, что они по-прежнему холостые. Следовательно, при отсутствии интереса

со стороны общества, женщине придется приложить большие усилия к построению долгосрочных отношений и официального брака.

Для решения этой проблемы был создан курс занятий. Он ставит перед собой задачу сформировать у женщины понимание, с которым она сможет оценивать будущие события своей жизни, общаться с более подходящими, но необычными для неё, мужчинами и строить долгосрочные отношения со своим избранником.

Для объективного оценивания психологической готовности женщины вступать в брак по методике главы 4 была построена модель [245]:

$$\begin{aligned}
 Y = & 0,4789 + 0,01484 x_1 + 0,04141 x_2 + 0,033594 x_3 + 0,046094 x_4 \\
 & + 0,097656 x_5 + 0,046094 x_6 + 0,02578 x_7 + 0,010156 x_2 x_5 + 0,010156 x_2 x_7 + \\
 & 0,010156 x_3 x_6 + 0,01016 x_1 x_2 x_3 - 0,01641 x_1 x_2 x_5 - 0,01797 x_1 x_3 x_5 \\
 & + 0,01016 x_2 x_3 x_4 - 0,01953 x_2 x_3 x_5 - 0,01016 x_2 x_4 x_5 - 0,01172 x_3 x_4 x_5 \\
 & - 0,02422 x_4 x_5 x_6 - 0,01016 x_5 x_6 x_7, \quad (*)
 \end{aligned}$$

где

X_1 – семейный и сексуальный опыт;

X_2 – возможность бороться с сопротивлением;

X_3 – способность эффективно обучаться;

X_4 – психологическая готовность к новой реальности;

X_5 – базовые психологические ресурсы женщины;

X_6 – навыки для работы над своим будущим;

X_7 – социально-психологический климат (окружение);

Y – психологической готовности женщины к созданию семьи.

Анализ данного факторного пространства метамоделю свидетельствует, с одной стороны, о максимально учтенных многогранные аспекты этой готовности, а с другой, – о высокой степени обобщенности всех переменных, которые, в свою очередь, являются функциями многих переменных, что и отражено на рисунке П.3.2.

Так, например, фактор X_5 – базовые психологические ресурсы женщины в метамоделю (*) является, в свою очередь, обобщением семи переменных, составляющих свое факторное пространство второго уровня иерархии [248]:

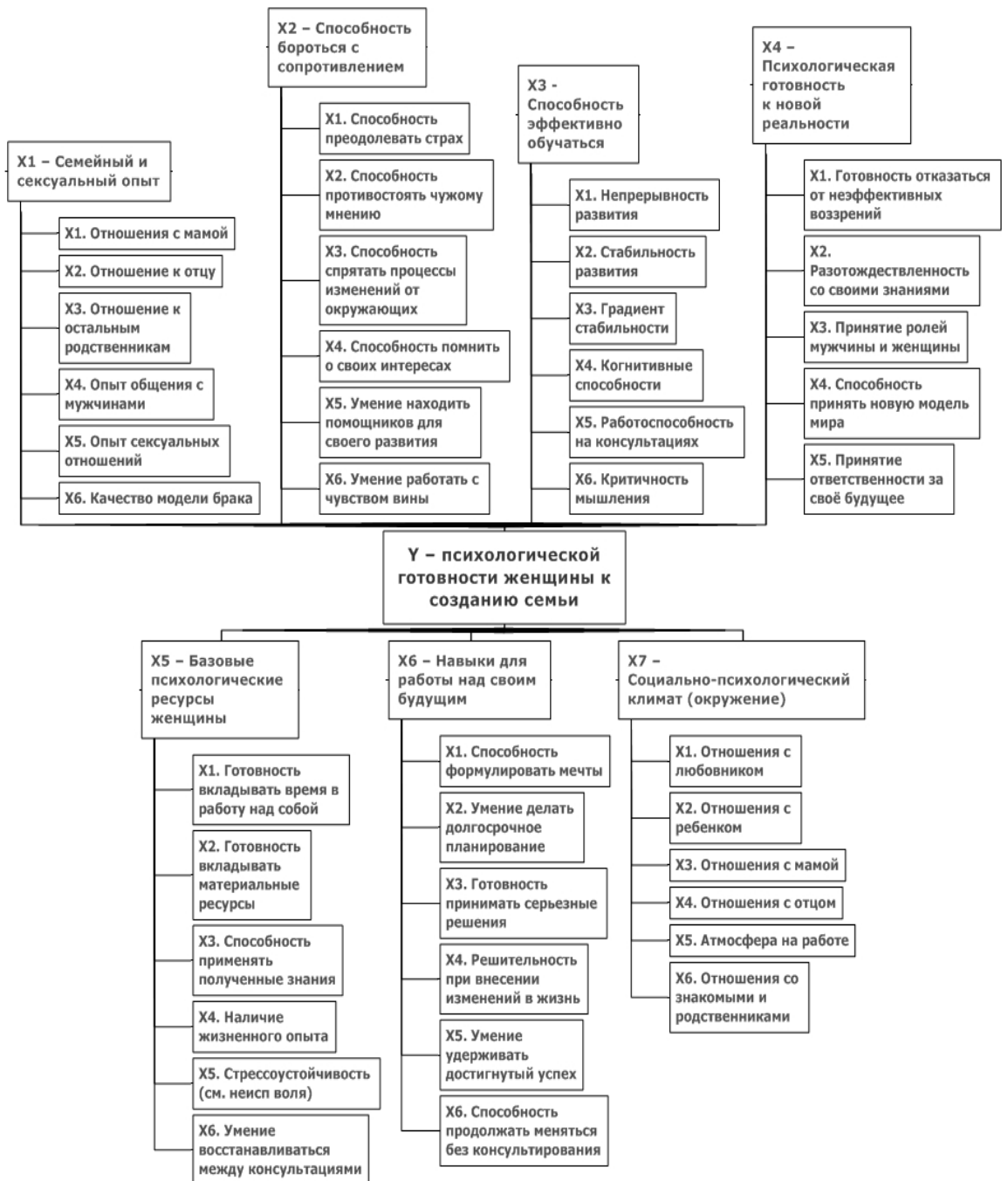


Рисунок П.3.2 – Дерево связей, представляющее базу знаний иерархической экспертной системы изучения сложного явления: X_{5.1} – готовность вкладывать время для работы над собой;

X_{5.2} – готовность вкладывать материальные ресурсы; X_{5.3} – способность

применять полученные знания; X_{5.4} – наличие жизненного опыта;

X_{5.5} – стрессоустойчивость; X_{5.6} – умение восстанавливаться между

консультациями.

Применение стандартной методики позволило синтезировать уравнение второго уровня иерархии:

$$Y_5 = (x_5) = 0,4789 + 0,0445 x_{5.1} + 0,0585 x_{5.2} + 0,032 x_{5.3} + 0,0367 x_{5.4} + 0,0085 x_{5.5} + 0,0367 x_{5.6} - 0,0085 x_{5.5} x_{5.6} - 0,0117 x_{5.1} x_{5.2} x_{5.4} + 0,0101 x_{5.2} x_{5.5} x_{5.6} + 0,0117 x_{5.3} x_{5.4} x_{5.6} + 0,0085 x_{5.3} x_{5.5} x_{5.6}. \quad (**)$$

Результатом вычислений по данному аналитическому выражению представляется возможным вместо экспертного заключения вычисление по модели (**), переменной Y_5 – наличие ресурсов на изменение жизни и подстановки ее количественного значения уже как x_5 в метауравнение (*).

По тому же принципу результирующая база знаний экспертной системы в данном конкретном случае будет представлена восемью полиномиальными моделями, охватывающими общей численностью более 40 переменных. Такой подход, безусловно, открывает широкое поле деятельности для психолога, вооружая его таким мощным средством получения количественных оценок при консультировании клиенток.

Заметим, что при наличии экспертной системы в виде готового компьютерного продукта клиентка может без участия эксперта проводить таким образом мониторинг наличия своих ресурсов на изменение жизни самостоятельно.

Для оценки степени адекватности модели изучаемому явлению проведено ситуационное исследование психологической готовности конкретных клиенток выйти замуж по данным мониторинга их подготовленности в различные моменты времени (таблица П.3.1).

Как показывает анализ данных таблицы П.3.1, динамика изменения Y подтверждает мнение эксперта и самого изучаемого явления.

Таким образом, на основе экспертных знаний получена модель, на основании которой представляется возможным проводить оценивание психологического состояния женщины в количественном виде, что даёт определённые преимущества и консультанту, и клиентке.

Таблица П.3.1 – Оценки психологической готовности женщины выйти замуж в процессе консультирования клиенток I и II

	КЛИЕНТКА I			КЛИЕНТКА II		
	Начало	I этап	II этап	Начало	I этап	II этап
X ₁	0.3	0.35	0.5	0.3	0.4	0.4
X ₂	0.5	0.5	0.6	0.4	0.6	0.6
X ₃	0.4	0.4	0.6	0.5	0.5	0.5
X ₄	0.4	0.5	0.7	0.4	0.4	0.5
X ₅	0.3	0.5	0.6	0.5	0.5	0.5
X ₆	0.5	0.6	0.7	0.5	0.6	0.7
X ₇	0.4	0.6	0.7	0.5	0.6	0.6
Y _p	0.353	0.481	0.684	0,431	0,494	0,543
Y _s	Н	НС-С	ВС-В	НС	С	С-НС

При помощи такого математического инструментария консультант методологически готов сравнивать свои интуитивные знания с результатами измерения (это сравнение имеет эффект самообучения), а также с мнением клиентки, что является способом повысить адекватность восприятия ею своих успехов.

Измерение и анализ всего комплекса факторов, которые развиваются с разной скоростью, представляют основу для составления плана действительно индивидуального консультирования. Так, данные о прохождении некоторых «контрольных точек» и информация о мешающих дальнейшему развитию факторах могут помочь консультанту быстрее «подобрать ключик» к клиенту.

Обратим особое внимание на необходимость разработки подобных экспертных систем. По объективным условиям развития современного общества, люди психологически очень быстро усложняются и реализуют в своем мировоззрении взгляды или их сочетания, которые редко или никогда не встречались в жизни. Большое количество вариантов жизненного опыта неизбежно влияет на вариативность мировоззрения, которое складывается в результате. И если

раньше консультанты и психологи работали преимущественно с типичными расстройствами или проблемами здоровых людей, то теперь их психика может быть разбалансирована все бóльшим количеством способов.

П3.3 Модель оценивания вероятности положительного выхода из игровой зависимости

Острота проблемы. Зависимость от компьютерных игр – это чрезмерное и навязчивое увлечение компьютерными играми, в ущерб реализации интересов человека, а также в ущерб нормального удовлетворения его потребностей. Всё это приводит к тому, что люди теряют возможность реализовать свою мечту и стать счастливыми.

Чрезмерное увлечение компьютерными играми имеет практически все симптомы, как химических, так и психологических наркотических зависимостей.

Для многих патологических игроков реальность становится менее привлекательной, поэтому такие игроки предпочитают проводить время в «виртуальной реальности». Как правило, они играют по многу часов подряд каждый день, не интересуются личной гигиеной, набирают или теряют значительный вес, не соблюдают режим сна. В крайних случаях люди теряют за компьютером сознание и даже умирают за игрой от истощения.

Всё это позволяет предположить, что с ростом разрабатываемых в бешеном темпе технологий виртуальной реальности, где человек сможет полностью погрузиться в виртуальный мир, появится новый класс людей, которые будут жить и умирать (физически) в виртуальном пространстве, вообще не выходя в реальность.

Известный психиатр и нарколог Александр Данилин утверждает: «Мы знаем, что душевные раны и язвы, возникшие у ребёнка в первые годы жизни, останутся с ним навсегда. Чувство одиночества и ненужности чаще всего является постоянным спутником их взрослой жизни».

Мы, люди, в отличие от многих других видов животных, рождаемся слишком рано. Развитие нашего мозга происходит ещё долгое время после рождения. У новорожденных детей нет механизма успокоения или управления эмоциями, поэтому дети кричат до тех пор, пока их не возьмут на руки, не приласкают и т.д. Значит зарождение и фундаментальное развитие психики происходит в этот период. Таким образом, причина многочисленных зависимостей, в том числе и игровых, скрыта в детстве. В то же время благополучие, достаточное количество любви и внимания, а также формирование правильных приоритетов и ценностей исключает у ребёнка появление каких-либо зависимостей. Можно с уверенностью утверждать, что игровая зависимость – это проблема личности, а не болезнь.

Дети, выросшие среди зверей (т.н. «Маугли»), не могут адаптироваться и социализироваться в обществе, они не могут научиться говорить, не смотря на усилия разнообразных психологов и на наличие здорового речевого аппарата. Такие дети остаются зверьми. То есть навыки, полученные детьми в детстве невозможно заменить. Поэтому необходимо ограничение на времяпрепровождение детей за компьютером. В настоящий момент существуют якобы «развивающие» игры для детей 2-3 лет. Родители таких детей или умиляются от того, что их чадо «ещё такое маленький, а уже умеет работать за компьютером», или используют компьютер в качестве «успокоительного», которое можно дать ребёнку и он больше не будет мешать.

В результате у ребёнка:

- не развивается или атрофируется своё собственное воображение, так как человек привыкает пользоваться чужими образами, а не придумывать свои, губя на корню появление творческого человека;

- не развиваются навыки обращения с предметами реальности, что способствует отчуждению человека от реальности и к усилению привлекательности виртуального мира, впоследствии делая человека социальным дезадаптантом.

Поскольку в специальной литературе фактически отсутствует системность в изучении такого негативного феномена нашего времени, решено было исследовать его с помощью методов математического моделирования [259].

Полиномиальная модель и извлечение новой информации. По методике, изложенной выше, получена нечеткая модель оценивания степени положительного исхода от консультирования клиента по избавлению от компьютерной зависимости [253]:

$$Y = 0,47109 + 0,04297x_1 + 0,03672x_2 + 0,00859x_3 + 0,02578x_4 + 0,04609x_5 + 0,03359x_6 + 0,00703x_7 + 0,01172x_1x_2 - 0,01484x_1x_2x_4 + 0,01328x_1x_4x_5 - 0,01172x_2x_6x_7. \quad (***)$$

Факторное пространство модели (***) включает следующие входные переменные:

X_1 - степень осознанности желания человека избавиться от зависимости;

X_2 - сколько времени человек проводит за играми;

X_3 - в каком состоянии находятся отношения с друзьями и родными, а также, какое значение в этом занимают игры;

X_4 - наличие других не физических увлечений;

X_5 - степень ответственности и дисциплины;

X_6 - занимается ли человек физическими активностями (физические увлечения);

X_7 - степень вовлечённости в проблемные виды игр;

выходная переменная:

Y - степень положительного результата от консультирования.

Как показывает анализ модели (***), наблюдается существенная нелинейность, которая заключается в наличии двойных и даже тройных взаимодействий независимых переменных.

Адекватность модели мнению эксперта подтверждает критерий

$$s_{\text{ост}} = 0,0167 < 0,05 = 0,5d(A),$$

где $s_{\text{ост}}$ - остаточное квадратическое отклонение, $d(A)$ - показатель нечёткости терм-множества (2.33).

Независимым критерием адекватности выступает также корреляция экспертных и расчётных по модели (***) , показанная на рисунке П.3.3.

Анализ поведения точек на рисунке П.3.3 указывает на высокую степень согласованности расчётных и экспертных значений, оцениваемую коэффициентом корреляции 0,94.

Остановимся более подробно на возможности извлечения дополнительной информации из модели (***) .

Ниже приведены результаты численного эксперимента, суть которого заключается в следующем. Все переменные фиксируются на определённом заданном уровне, кроме одной, которая затем пробегает все значения в интервале $[-1, +1]$.

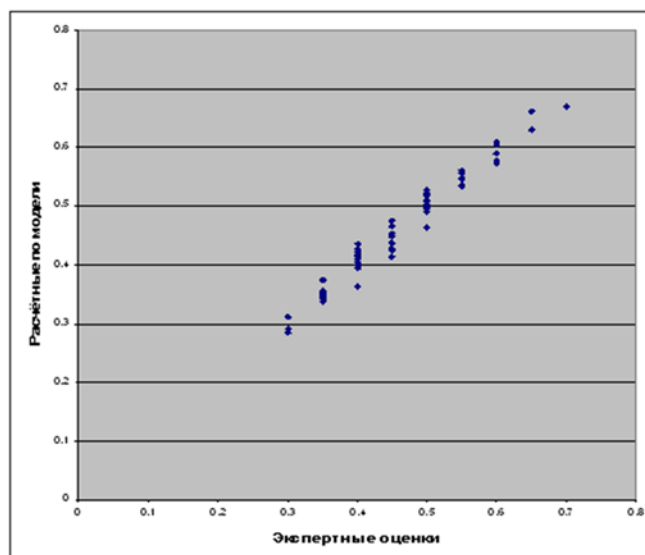


Рисунок П.3.3 – К оценке адекватности модели (***)

Примеры проведенного численного эксперимента [234] для двух фиксированных уровней переменных приведены на рисунке П.3.4.

Анализируя поведение графиков, можно извлечь новую информацию [234]. Во-первых, по изменчивости поведения определённого фактора возможно даже визуально увидеть его значимость в различные этапы консультирования. Определяя таким образом уровень состояния человека на пути избавления, удастся также выделить конкретные факторы влияния, над которыми необходимо поработать и консультанту, и самому Игроку. Это даёт возможность более

целенаправленного консультирования, сужая проблемную область и облегчая задачу индивидуализации программы проведения бесед консультантом.

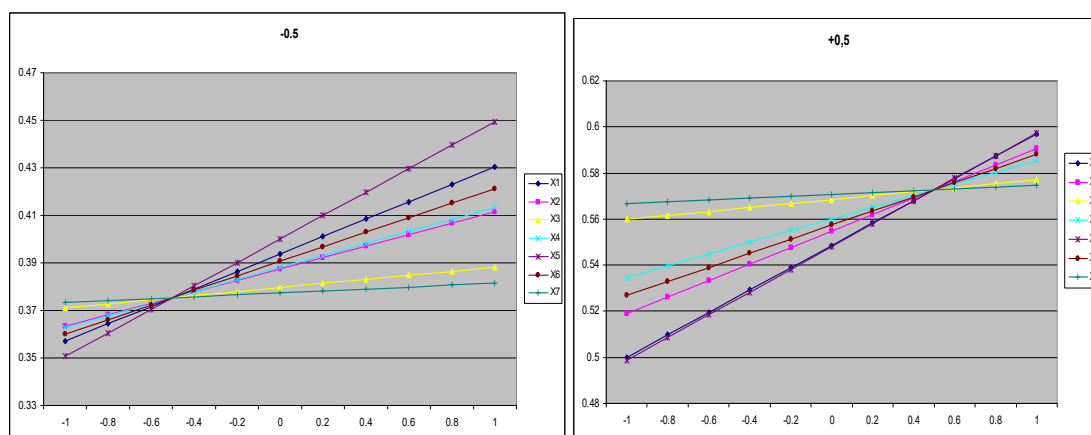


Рисунок П.3.4 – Результаты численного эксперимента при фиксированном уровне переменных: а – уровень $-0,5$; б – уровень $+0,5$

В заключение можно сделать некоторые фундаментальные выводы применительно к решению задач психологии. Так, предлагаемая математическая и инструментальная прозрачность методики позволяет:

целенаправленно воздействовать на наиболее проблемные места в психике клиента при консультировании;

подробно планировать работу на большой срок;

количественно показывать клиенту его достижения и изменения в психике;

более полно осознавать изменения в психике клиентки самим консультантом;

видеть и количественно оценивать динамику развития личности и создавать на ее основе интерпретации, необходимые для создания новых теорий и подходов в области консультирования

Кроме того, мониторинг консультирования «в цифрах», представляемый клиенту на каждом этапе, сам по себе обладает терапевтическим эффектом и влияет на самооценку, готовность вкладывать большее количество душевных и материальных ресурсов в работу над собой, повышает уверенность в том, что поставленные цели будут достигнуты.

Данный метод позволяет в понятном со школьной скамьи числовом выражении получить описание процесса развития психики клиента. Результаты в цифрах гораздо более информативны, чем в лингвистическом виде, когда клиенту приходится описывать «улучшение» состояния или приобретение «нового понимания». Но при этом невозможно сделать оценку, насколько революционно данное «улучшение», или насколько «новым» можно считать сформированное «понимание».

Применение данной методики учит также и самого консультанта мыслить системно, структурируя свои субъективные знания. При этом с помощью факторного пространства можно обсуждать объективные эффекты от примененных к клиенту психологических методик, оценивать эти методики в цифрах и сравнивать их между собой по заданным параметрам.

В силу особенностей своей профессии психологи-консультанты выступают в качестве экспертов со всеми качествами «интеллектуальной измерительно-диагностической системы» [239]. Такой подход делает необходимым условием задачу извлечения экспертных знаний из глубины его подсознания, где хранится накопленный опыт и интуиция, с последующей формализацией их в виде логико-лингвистических моделей.

Данный метод предлагает психологам решение проблемы извлечения и представления экспертных знаний. Параллельно с экспертной оценкой состояния клиента теперь можно производить оценивание как объективную формальную процедуру.

Применение данной методики учит и самого консультанта мыслить системно, структурируя свое субъективное знание. А с помощью факторного пространства появляется возможность обсуждать объективные эффекты от примененных к клиенту методик, оценивать эти методики в цифрах и сравнивать их между собой по эффективности.

Если определённый объём таких «замеров» выявит некие закономерности, то появится новое поле для построения теорий и интерпретаций механизмов воздействия, что раньше было невозможно.

Формализованное аналитическое выражение – модель – позволяет применять математический анализ для выявления и исследования более глубоких явлений в психике клиентов.

Поскольку психофизический предел человека в осознании факторов – максимум девять, а практика применения предлагаемой методика позволяет утверждать, что существенно отличных от нуля коэффициентов модели гораздо выше, то можно высказать содержательную гипотезу: линейная часть полинома отражает явные знания, тогда как нелинейная – неявные знания консультанта-эксперта. При этом подсознательно выделенные эффекты можно оценить и количественно, чего другие методики не позволяют в принципе.

Кроме того, при минимальных навыках клиент способен самостоятельно оценивать значение переменных и получать оценки проведенного этапа консультирования, выраженную одним числом. Это предоставляет дополнительные возможности для контроля процесса консультирования и самоконтроля. Так, если клиент и консультант выставили свои оценки одному и тому же процессу консультирования, у них появляются новые темы для обсуждения – насколько одинаково они оценивают решаемые задачи и достигнутые результаты, на каких именно моментах делают особые акценты и чем эти люди в системе «консультант-клиент» отличаются в мировоззренческих вопросах, связанных с личностным ростом.

В методологическом плане разработанная методика предоставляет возможность вплотную приблизиться к построению, проведению и контролю индивидуальной формы обучения, каждый этап которой может быть оценен в цифрах.

При применении разработанной методики существует возможность сравнения процессов консультирования разных клиентов разными консультантами и при этом получать полностью сравнимые результаты. На основании этого появляется возможность сравнивать в цифрах эффективность разных психологических техник, примененных к клиентам.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4. ЭФФЕКТ «ЕМКОСТИ ИНФОРМАЦИИ» ПРИ ОЦЕНИВАНИИ СОСТОЯНИЯ СЛО

Поскольку количество входных переменных, которыми может оперировать эксперт как человек, психофизически ограничено величиной 7 ± 2 [309], то они, по возможности, должны быть «достаточно ёмкими», т.е. обобщенными. Понятие «обобщенности» переменной довольно субъективно и зависит, на наш взгляд, в первую очередь от уровня принимаемых решений. Например, для оператора-технолога и лица, принимающего решения высокого уровня (ЛПР ВУ) степень обобщенности одной и той же воспринимаемой информации о протекании процесса существенно различна.

Обратимся за разъяснением данного феномена к теории энтропийных потенциалов (ТЭП) [126]. Величина энтропийного потенциала (ЭП) Δ_e в общем случае имеет размерность рассматриваемого параметра. Применяя ТЭП к проблеме данного исследования, в качестве предполагаемого масштабного коэффициента K_e , численные значения которого зависят от вида предполагаемого распределения и приведены в работе [126], а также используя вместо среднего квадратического

отклонения (СКО) изменения признака величину нечеткости $d(A) = \frac{\alpha + \beta}{2}$ (α, β – соответственно левый и правый коэффициенты нечеткости) соответствующего терма НЧ на шкале признака, получим выражение для ЭП в виде:

$$\Delta_e = K_e d(A). \quad (\text{П4.1})$$

Тогда количество информации, порожденное изменением состояния неопределенности системы I , например от начального терма Δ_1 распределения признака до конечного Δ_n , получим выражение:

$$I = \ln \frac{\Delta_1}{\Delta_n}. \quad (\text{П4.2})$$

Отсылая к обоснованию теоретических тонкостей к работе [126], отметим ряд особенностей данного подхода, представляющих интерес для практического приложения в рамках настоящего исследования:

- количество информации I , порожденное изменением состояния неопределенности системы, «инвариантно» относительно базовых значений ее параметров, поэтому для проведения соответствующих расчетов достаточно ограничиться использованием ЭП;

- величина I может принимать как положительные, так и отрицательные значения ($-\infty < I < +\infty$). Отрицательная величина признака соответствует повышению уровня состояния неопределенности системы в конце рассматриваемого этапа, и наоборот. Такое введенное понятие информации является обобщающим, включающим в себя и «классическое» определение, а для исключения путаницы в трактовке в дальнейшем обозначается I_L ;

- одним из достоинств обобщенного понятия информации I_L является возможность описания взаимосвязи между информационными, энергетическими и материальными субстанциями, что непосредственно следует из выражений (П4.1) и (П4.2):

$$I_L = \ln \frac{\Delta_1}{\Delta_n} = \frac{K_{e1}}{K_{en}} \frac{d(A)_1}{d(A)_e} = \ln k_e + \ln \frac{d(A)_1}{d(A)_e}, \quad (\text{П4.3})$$

где

$$k_e = \frac{K_{e1}}{K_{en}} - \text{коэффициент преобразования закона распределения параметра}$$

и характеризует его трансформацию в зависимости от решаемой задачи конкретной области знаний.

Поэтому, в контексте исследуемой проблемы выражение (П4.3), например, восприятие информации рядовым рабочим и директором крупного предприятия, потенциально можно рассматривать как описание взаимосвязей в комплексе субстанций:

информация – уровень принятия решения – занимаемая должность.

Рассмотрим гипотетический пример (таблица П.4.1). Пусть в условиях численного эксперимента «степень ответственности за процветание» предприятия выразим в лингвистическом виде, как показано на рисунке П.4.1.

Здесь примем обозначения мод термов: Н – рабочий одного из цехов, НС – мастер цеха, С – начальник цеха, ВС – главный инженер предприятия, В – директор

предприятия. Согласно полученным данным вычислим соответствующие значения для расчета I_L по (П4.1)-(П4.2).

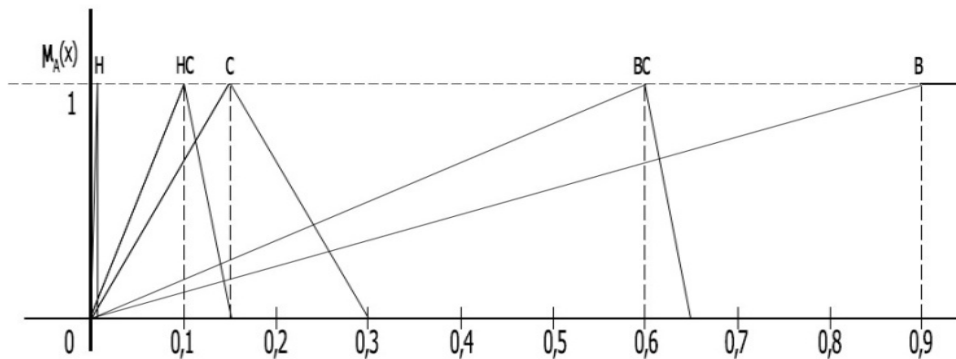


Рисунок П.4.1 – «Степень ответственности за процветание предприятия» как лингвистическая переменная

Таблица П.4.1 - Расчетные данные для численного эксперимента по энтропийному потенциалу внутри одного предприятия ($e=1, \dots, 5$)

	Н	НС	С	ВС	В
	1	2	3	4	5
k_e	1	1,1	1,2	1,4	2
$d(A)_e$	0,01	0,1	0,15	0,6	0,9
Δ_e	0,01	0,011	0,18	0,84	1,8
$d(A)_e / d(A)_1$	1	10	25	84	180
$\ln \left(d(A)_e / d(A)_1 \right)$	0	2,30	3,22	4,43	5,20

Тогда согласно формуле (П4.3) для удержания уровня стабильности предприятия поступающая информация, которой владеет каждый из должностных лиц для принятия решения в зависимости от их статуса, должна быть не меньшей, чем рассчитанная по (1.12), а ее «сгущение» («емкость») демонстрирует вид рисунка П.4.2.

Выводом из рассмотренной неоднозначности информации, формально выраженной одними и теми же словами, в зависимости от уровня лица, принимающего решение, является ее свойство «сгущения», которое можно количественно оценивать с точки зрения энтропийного потенциала.

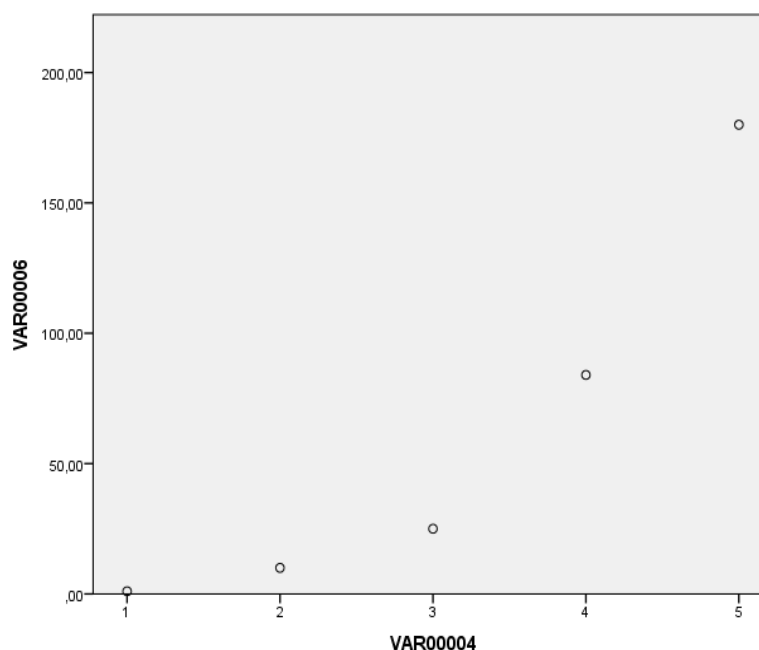


Рисунок П.4.2 – К интерпретации понятия «сгущение информации» по таблице П.4.1: ось абсцисс – моды термов, ось ординат – «мера сгущения» в виде

показателя $d(A)_e / d(A)_1$

Таким образом, необходимым условием извлечения экспертных знаний из глубины его подсознания, где хранится накопленный опыт и интуиция, является такая технология опроса эксперта, которая не требует от него дополнительных усилий или условий. Иными словами, *применительно к уровню решаемой проблемы необходимо выбирать эксперта с соответствующим уровнем знаний, опыта и интеллекта.* Тот же подход необходимо использовать при подборе информации для ЛПР ВУ, если желателен положительный результат его решения. Так, например, спрашивая эксперта о весовых коэффициентах значимых переменных, совершаются, по крайней мере, две ошибки: *заранее определяют ответ в виде линеаризованной функции и заведомо сужают рамки доступа к неявным экспертным знаниям, опыту и интуиции.*

ПРИЛОЖЕНИЕ 5. О НОВОМ КЛАССЕ ЗАДАЧ В ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

При решении общей проблемы основные классы задач применительно к теории управления динамическими (ДС) системами *дополняются новым классом задач моделирования.*

Состояние классической динамической системы в общем виде задается использованием четырех базисных множеств и 2-х отображений [57]:

$$\text{ДС} = \langle \mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{U}, \mathbf{E}, \mathbf{T}, \varphi, \psi \rangle,$$

где

\mathbf{X} – множество состояний ДС,

\mathbf{Y} – множество выходов ДС,

\mathbf{U} – множество управляющих воздействий,

\mathbf{E} – множество возмущающих воздействий,

\mathbf{T} – множество моментов времени,

$\mathbf{V} = \mathbf{U} \times \mathbf{E}$ – множество входных воздействий,

$\varphi : \mathbf{X} \times \mathbf{V} \times \mathbf{T} \rightarrow \mathbf{X}$ — переходное отображение,

$\psi : \mathbf{X} \times \mathbf{V} \times \mathbf{T} \rightarrow \mathbf{Y}$ — выходное отображение,

Переходное и выходное отображения задаются как функции φ и ψ .

Тогда основные классы задач применительно к теории управления динамической системы с учетом разработанного в диссертации подхода примут вид, как показано в таблице П.5.1.

Обобщенное описание динамической системы позволяет, анализируя свойства множеств и отображений:

- образовывать различные конкретные частные классы моделей ДС;
- устанавливать взаимосвязи между указанными классами;
- организовывать многомодельные исследования реально протекающих процессов.

Таблица П.5.1 - Основные классы задач теории управления ДС (ТУ ДС)

Элементы ДС Классы задач ТУ ДС	U	X	Y	φ ψ
Задачи анализа	+	+	?	+
Задачи наблюдения (мониторинга)	+	?	+	+
Задачи управления	?	+	+	+
<i>Задачи</i> <i>моделирования</i>	+	+	+	?

ПРИЛОЖЕНИЕ 6. ДОКУМЕНТЫ О ВНЕДРЕНИИ И ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель директора филиала
ФГУП «ЦЭНКИ» - Космический центр-
«Южный»
« » ноября 2010 г.
С.И. Блюм
м.п.

АКТ
о реализации результатов докторской диссертации
СПЕСИВЦЕВА Александра Васильевича
в филиале ФГУП «ЦЭНКИ»- Космический центр «Южный»

Комиссия в составе:

председателя - начальника службы эксплуатации Центра испытаний и контроля эксплуатации филиала ФГУП «ЦЭНКИ»- КЦ «Южный» Агишева В.С.;

членов: заместителя начальника службы эксплуатации Центра испытаний и контроля эксплуатации филиала ФГУП «ЦЭНКИ»- КЦ «Южный» Малигона А.В.;

начальника группы-лаборатории мониторинга технического состояния объектов НКИ космодрома Байконур Ильина В.В.

составила настоящий акт в том, что результаты докторской диссертации Спесивцева А.В., посвященной разработке методов оценивания состояния сложных объектов на основе формализации неявных экспертных знаний, а именно:

способы представления нечеткой информации при формализации неявных экспертных знаний;

методы и алгоритмы извлечения и структуризации экспертной информации в виде математических моделей;

методики и алгоритмы оценивания качества состояния сложных объектов, функционирующих в многомерных пространствах нечетких переменных, в виде обобщенных показателей

реализованы в Филиале ФГУП «ЦЭНКИ» - КЦ «Южный» при оценивании степени критичности наземных составных частей ракетно-космических комплексов по остаточному ресурсу.

При этом реализация результатов диссертационной работы соискателя позволила повысить точность прогнозирования остаточного ресурса примерно в 1,5 - 1,7 раза при экономии в 1,5 раза затрат времени на разработку экспертных прогнозов.

Акт выдан для представления в Совет по защите докторских и кандидатских диссертаций.

Председатель комиссии:

В.С. Агишев

Члены комиссии:

А.В. Малигон

В.В. Ильин



Международная академия наук экологии и безопасности жизнедеятельности
International academy of ecology and life protection sciences

Норильское региональное отделение

Norilsk Regional Branch

663316, Норильск, а я 16 E-mail eco@norcom.ru

(3919) 22-10-32., Fax (3919) 22-15-26

АКТ внедрения, передачи информационно-технологических и методических материалов

г.Норильск

19 апреля 2000 г.

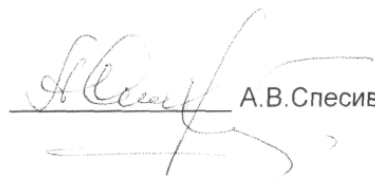
Мы, нижеподписавшиеся, представитель Норильского индустриального института Спесивцев Александр Васильевич, к.т.н., доцент, с одной стороны, и президент Норильского регионального отделения МАНЭБ д.т.н. Савченко Виталий Александрович с другой стороны, составили настоящий акт внедрения, передачи информационно-технологических и методических материалов по экспертной системе принятия решений с применением нечетких множеств в области прогнозирования состояния основания плотины пирротинохранилища, эксплуатируемой в условиях Крайнего Севера на многолетнемерзлых грунтах.

Акт составлен в трех экземплярах.

Президент отделения

Представитель института


В.А.Савченко


А.В.Спесивцев



ННУ «БИТИС»

г. Санкт-Петербург, пр-т Светлановский, д. 2, оф. 306,
тел./факс (812)380-06-34, e-mail: nnubitis@mail.ru

А К Т
внедрения, передачи информационно-технологических
и методических материалов

Настоящим актом подтверждается, что результаты исследований к.т.н., доцента Спесивцева Александра Васильевича в ходе выполнения диссертационной работы на тему «Теория и методология управления риском чрезвычайных ситуаций на основе формализации экспертной информации» внедрены и находят применение в ННУ «БИТИС»:

- *экспертная система обобщенной оценки физического состояния сооружений, эксплуатируемых в промышленных условиях;*
- *экспертная система оценки риска сокращения популяции диких животных различных регионов России на базе формализации экспертной информации с применением нечетких множеств.*

Акт составлен в трех экземплярах.

Генеральный директор
ННУ «БИТИС»
Прокопчина С.В.



«16» 09 2007 г.

УТВЕРЖДАЮ
 Заместитель генерального директора по
 НИОКР — Первый заместитель генерального
 директора ФГУП «СКБ «Титан» А.В. Логунов
 « 2010 года



А К Т

о реализации результатов докторской диссертации
 Спесивцева Александра Васильевича
 в ФГУП «СКБ Титан»

Комиссия в составе:

председателя – главного конструктора Марчука Е.Н.;

членов: начальника отдела Петухова А.Б.;

заместителя начальника отдела Карпука Г.С.

составила настоящий акт в том, что результаты диссертации Спесивцева А.В., посвященной разработке методов оценивания состояния сложных технических объектов на основе формализации экспертной информации, а именно:

способы представления нечеткой информации при формализации неявных экспертных знаний;

методы и алгоритмы извлечения и структуризации экспертной информации в виде математических моделей;




методики и модели оценивания качества состояния сложных технических объектов, функционирующих в многомерных пространствах нечетких переменных, в виде обобщенных показателей

частично реализованы в ФГУП «СКБ Титан» при выборе и обосновании методов оценивания остаточного ресурса разработанных ФГУП «СКБ Титан» систем объектов, эксплуатирующихся в составе ракетно-космических комплексов МО РФ.

При этом реализация результатов диссертационной работы позволяет повысить точность прогнозирования остаточного ресурса разработанных ФГУП «СКБ Титан» и эксплуатируемых на объектах МО РФ систем и снизить временные затраты на разработку экспертных прогнозов. Особенно актуально для оценки систем, эксплуатируемых за пределами заданных гарантийных сроков эксплуатации

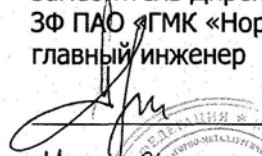
Председатель комиссии:

Члены комиссии:

 Е.Н.Марчук
 А.Б.Петухов
 Г.С.Карпук



УТВЕРЖДАЮ
Заместитель Директора
ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» -
главный инженер


12 / 04 / 2019 А.И. Девочкин

АКТ



О реализации результатов докторской диссертации СПЕСИВЦЕВА Александра Васильевича на Медном заводе Заполярного филиала ПАО «Горно-металлургической компании «Норильский Никель»

Составлен комиссией:

- Председатель: заместитель Директора ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» - главный инженер Девочкин А.И.
- Члены комиссии: 1. Главный инженер Медного завода Матюхин Д.А.
2. Заместитель главного инженера Медного завода по развитию технологий Щербаков С.В.

Комиссия составила настоящий акт в том, что результаты докторской диссертации Спесивцева А.В. «Формализация и использование явных и неявных экспертных знаний для оценивания состояния сложных объектов на основе нечетко-возможностного подхода», а именно:

- методы извлечения, представления и формализации экспертной информации в виде аналитических моделей;
- методики и алгоритмы оценивания качества и пригодности созданных моделей состояния сложных объектов, эксплуатируемых в условиях существенной неопределенности при воздействии множества контролируемых и внешних факторов,

реализованы на Медном заводе ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» (г. Норильск) при создании интеллектуальной автоматизированной системы управления (ИАСУ ПВ) технологическим процессом плавки сульфидных медно-никелевых материалов в печи Ванюкова. ИАСУ ПВ внедрена в промышленную эксплуатацию в 2015 году и функционирует в настоящее время.

Реализация результатов диссертационной работы Спесивцева А.В. позволила перевести управление процессом на качественно новый уровень мониторинга в режиме реального времени, что способствует раннему обнаружению приближения к предельным (предаварийным) состояниям процесса, ведению процесса в «узком» коридоре значений основных технологических параметров согласованности и выполнении всех плановых заданий как по качеству конечных продуктов, так и по производительности.

При этом «Способ автоматического управления процессом плавки медно-никелевого сульфидного сырья в печи Ванюкова при переработке сульфидной шихты на штейн» защищен патентом РФ № 2 571 968.

Акт выдан для представления в Совет по защите докторских и кандидатских диссертаций.

Члены комиссии:



Д.А. Матюхин

С.В. Щербаков