

Чубуков Н.Н.

Возможные пути повышения качества экологического менеджмента оборонных предприятий

В статье отражено состояние отечественных средств и методов экологического контроля. Освещены некоторые трудности метрологического обеспечения разработок средств измерения концентраций вредных веществ в воздухе, воде и почве. Предложены разработанные автором научно-методические подходы к решению актуальных задач экологического мониторинга с использованием систем искусственного интеллекта, распознавания образов, нейронных сетей.

Необходимым условием конкурентоспособности вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ) является эффективное функционирование систем экологического менеджмента, систем управления охраной труда предприятий, выполняющих государственный оборонный заказ или претендующих на его выполнение, а также осуществляющих разработку, производство, эксплуатацию, ремонт и утилизацию ВВСТ в интересах Вооруженных Сил.

Игнорирование экологического фактора в развитии оборонно-промышленного комплекса (ОПК) советского и постсоветского периодов нанесло серьезный ущерб природной среде России, значительные территории превращены в зоны экологического неблагополучия. Особенно тяжелые последствия для экологии повлекли производство, испытания и уничтожение ядерного, химического и биологического оружия, утилизация ядерных подводных лодок и ракетно-космическая деятельность из-за загрязнения обширных территорий страны компонентами токсичных ракетных топлив.

Недостаточный учет значимости природоохранных приоритетов в системе государственного управления оборонной промышленностью является причиной продолжающегося нарастания деэкологизации страны. Это проявляется в увеличении выбросов и сбросов загрязняющих веществ в атмосферу, почвы и водоемы, росте масштабов техногенных катастроф, деградации природных территорий, обеспечивающих глобальное экологическое равновесие на Земле. Объем переработанных и необезвреженных отходов в России за последние десять лет увеличился на 16%, в целом по стране количество неутилизированных отходов оценивается приблизительно в 82 миллиарда тонн, а

средний уровень вторичного использования промышленных отходов составляет 35% [1].

Решение возникающих проблем существенно осложняется моральным устареванием нормативно-технической базы, неотработанностью правовых механизмов, регламентирующих экологические аспекты деятельности оборонных предприятий, а также требованиями секретности.

Реальной возможностью вывода из экологического кризиса огромных территорий Российской Федерации, находящихся в сфере влияния оборонной промышленности и Вооруженных Сил, стало внедрение на предприятиях ОПК систем экологического менеджмента, сертифицированных по ISO 14000. На современном этапе совершенствования ОПК в условиях его инновационного развития и расширения отечественного и международного рынка, сертификация экологического менеджмента по ISO 14000 обеспечивает кредит доверия в отношении предприятия сторонами и обеспечивает успех любой долгосрочной стратегии, направленной на устойчивый экономический рост.

Экологический менеджмент предприятия ОПК представляет собой комплекс мероприятий, направленных на разработку и реализацию его экологических целей, экологической политики, проектов и программ, и предполагает такое управление производством ВВСТ, при котором достигается оптимальное соотношение между экономическими и экологическими показателями.

Обязательной экологической сертификации подлежат предприятия и организации оборонной промышленности, использующие экологически вредные технологии, оборонная продукция, способная отрицательно повлиять на окружающую среду, а так же



отходы производства и деятельность в сфере обращения с отходами [2].

Организационно-технической основой экологического менеджмента являются проверяющие и корректирующие действия, выполняемые по результатам экологического мониторинга, определяющего степень воздействия предприятия на окружающую среду на основе принятой экологической модели [3,4].

Экологическая модель является важной частью экологического менеджмента, необходимой для последовательного уменьшения отрицательного воздействия на окружающую среду и стабилизации нормальных значений параметров контроля. Она содержит с одной стороны - перечень установленных нормативов, а с другой – измеряемые количественные параметры, характеризующие текущее состояние экосреды. Использование в программном обеспечении экологической модели статистических методов и оперирование структурированными базами данных дистанционного зондирования экосреды в реальном масштабе времени позволяет моделировать «сценарии» возможного изменения фактического воздействия промышленного производства на окружающую среду, прогнозировать возможные варианты изменения производственного цикла, внедрения различных технологий, оценивать экологические риски, и таким образом определять оптимальную стратегию экологического менеджмента.

При разработке экологической модели используются обобщенные данные обо всех экологических аспектах и рисках, связанных с деятельностью оборонного предприятия:

- результаты физико-химической, микробиологической и радиологической экспертизы состояния среды (газового, водного и почвенного секторов);

- результаты анализа этапов производства, стадий жизненного цикла оборонной продукции, процессов и видов деятельности, реализованных на предприятии ОПК, которые могут оказать воздействие на среду;

- размеры контролируемых территорий и уровень их техногенного освоения;

- пределы толерантности экосистемы к факторам производства;

- схемы размещения отходов;

- схемы зонирования мониторируемой территории по признаку общности мер экобезопасности;

- показатели выбросов загрязняющих веществ в атмосферу и сбросов в поверхностные воды, их интенсивность и объем;

- статистику медицинского обследования населения и др.

Экологическая модель предприятия ОПК, с одной стороны, оперирует результатами измерений параметров среды, получаемых от средств измерений и связана с государственной системой стандартизации и метрологического надзора через обязательные процедуры государственной регистрации средств измерений. При этом средства измерений проходят испытания типа [5], государственную аттестацию методик выполнения измерений, а также периодические проверки и калибровки, выполняемые аккредитованными установленным порядком лабораториями [6] путем сличения с государственными стандартными образцами. С другой стороны, она связана с системой государственного экологического контроля путем установления предельно допустимых концентраций (ПДК) в воде, атмосферном воздухе, воздухе рабочей зоны и почве, а также через внешнее аудирование системы экологического менеджмента.

Таким образом, экологическая модель выполняет следующие функции экологического менеджмента:

- замыкает на себе информационный обмен с государственными органами, что обеспечивает законность и прозрачность принимаемых решений;

- обеспечивает координацию процедур мониторинга, измерений и регистрации данных;

- осуществляет оценку рисков и предупреждение о чрезвычайных ситуациях;

- определяет внутренние и внешнеполитические решения для эффективного функционирования и развития системы экологического менеджмента оборонного предприятия.

Особенно высокие требования предъявляются к средствам измерений (СИ) [7], являющихся технической составляющей систем экологического мониторинга.



Эти приборы являются первичными источниками измерительной информации, определяющими достоверность и точность химического анализа воздуха и воды, радиологического анализа питьевой воды, сточных и поверхностных вод, почвы, уровня радиации, электромагнитных полей, уровень шума, вибрации и др.

Применение измерительного оборудования для экологического мониторинга выполняется в соответствии с аттестованными методиками, предписывающими обязательное выполнение следующих операций:

- определение набора измеряемых параметров контроля, их диапазонов измерения, допусков точности и необходимой достоверности результатов;
- определение мест и порядка пробоотбора и пробоподготовки;
- выбор методов и средств измерений, обеспечивающих требуемое качество измерительной информации;
- привязка средств измерений к государственным эталонам;
- создание требуемых условий проведения измерений;
- программная обработка результатов измерений.

Каждое оборонное предприятие имеет свой индивидуальный набор вредных веществ, сопровождающих производственно-технологический процесс. Количество реально контролируемых соединений в промышленности не превышает 40...50 для воздушной среды рабочей зоны, число установленных ПДК воздуха рабочей зоны составляет около 2400 загрязнителей воздуха рабочей зоны, а фактически промышленное производство сопровождает не менее 4000 загрязнителей воздушной среды, влияющих на здоровье трудящихся и населения. Необходимо учитывать, что ПДК определяются примерно для 10% веществ от общего числа ежегодно внедряемых в промышленность новых соединений.

Отставание номенклатуры разрабатываемых средств измерения от количества внедряемых вредных веществ существенно снижает эффективность экологического менеджмента в целом, и обусловлено методическими сложностями метрологического обеспечения в сфере экспресс-измерений

сред. В [8] отмечается, что для гарантированного достижения достоверных результатов измерительное оборудование перед использованием должно быть откалибровано или проверено с установленной периодичностью или относительно измерительных международных или национальных эталонов. Если такие эталоны не существуют, основные положения, используемые для калибровки, должны быть зарегистрированы. Таким образом, необходимым условием узаконивания процедуры измерения вредного вещества является разработка и регистрация государственного эталона его концентрации, а также методики поверки, определяющей последовательность применения средств поверки и соблюдение условий поверки для передачи эталонных концентраций к средствам измерения согласно поверочной схеме.

В реальности при решении вопросов организации метрологического обеспечения разработчики технических средств экологического мониторинга сталкиваются с серьезными трудностями. Например, измерения концентраций веществ-загрязнителей воздушной среды выполняются в предположении, что отсутствуют другие примеси, и измеряемое вещество находится не в соединении. Это означает, что поверка и калибровка средств измерений выполняется в идеальных условиях, когда эталоном является государственный стандартный образец определенного вещества фиксированной концентрации на фоне нейтрального газа. В условиях реального производства вещества в чистом виде не встречаются, и измеряемое вещество, присутствуя в смеси, зачастую имеет настолько отличающиеся химические свойства, что целевой сенсор на него просто не реагирует, а показывает присутствие зачастую неизвестных фоновых компонентов. Токсичность измеряемого вещества в соединениях также может отличаться от его токсичности при отсутствии примесей. Критичными к условиям измерений смеси показателями качества измерений являются:

- достоверность распознавания, характеризующая степень соответствия сделанного при измерениях вывода о составе смеси действительному составу смеси;



- селективность сенсора, определяющая его способность различать молекулы целевого вещества, присутствующего в смеси. Выходной сигнал идеально селективного (специфичного) сенсора зависит только от количества молекул целевого вещества в смеси и не зависит от концентраций фоновых компонентов.

Значительные сложности метрологического характера связаны с измерениями пыли, концентраций окислов железа и марганца в сварочных аэрозолях, вредных компонентов автомобильных выхлопов, органических веществ и др.

На 1993 год, по данным Американского химического общества, около 90% из более чем 6 млн. зарегистрированных химических веществ-загрязнителей, составляют синтетические соединения, поэтому задача химического экспресс-анализа смесей для повышения качества экологического мониторинга предприятий ОПК является весьма актуальной. Одно и то же вещество может входить в смесь неоднозначно. Например, при химическом контроле водной среды, присутствующие в воде тяжелые металлы (Cd, Pb, Ni и др.) могут находиться в виде ионов, неорганических и органических соединений, могут быть адсорбированы на твердых примесях металла или осаждены в виде покрытия, могут присутствовать в виде включений в кристаллические структуры. Для каждого случая должна решаться сложная и трудоемкая метрологическая задача подбора принципа измерений, выбора специфичных сенсоров, разработки средств измерений и определения ПДК. Такая задача требует проведения комплексных НИОКР для каждого вещества и подключения множества организаций метрологического, химического, экологического и медицинского профиля с выходом на производство.

Измерение концентраций компонентов смесей предполагает построение сложных нелинейных зависимостей на основе многомерной калибровки. Размерность планов калибровочных процедур для смесей увеличивается настолько, что затраты на метрологическое обеспечение приборов соизмеримы с затратами предприятия на создание и содержание химической лаборатории для качественного и количественного химического

анализа. При этом откалиброванные приборы далеко не всегда могут удовлетворять метрологическим требованиям по воспроизводимости и достоверности измерений.

Сложность решения задачи распознавания смеси существующими и предлагаемыми выше методами обусловлена следующими факторами, на которых обычно не акцентируется внимание:

А. Даже в простейшей постановке при однокомпонентной смеси и селективном датчике определение концентрации является обратной задачей регрессии, относящейся к некорректным [9], так как при калибровке статистически корректно можно построить функцию преобразования сенсора $U=F(C)$, а для измерений необходима его калибровочная характеристика $C = G(U)$. Эти функции являются взаимобратными $G(U) = F^{-1}(U)$. Необходимость менять функцию и аргумент местами при калибровке и при измерениях является причиной существенных методических погрешностей, которые многократно возрастают при усложнении функции преобразования $F(C)$, и увеличении количества элементарных математических операций в алгоритмах обработки измерительной информации, содержащей погрешность первичного преобразования [10]. Именно поэтому при разработке сенсоров их функции преобразования стараются сделать линейными, зачастую аппроксимируя заведомо нелинейную зависимость.

Б. Построение полнофакторной модели калибровочной характеристики для распознавания смеси, при котором создаются все возможные комбинации концентраций компонентов смеси, является сложным даже в линейной постановке, а объем измерений при калибровке становится неоправданно трудоемким. Стремясь понизить размерность пробоподготовки при калибровке уменьшают количество точек разбиения диапазонов концентраций компонентов, что ухудшает качество калибровки. По той же причине шкалу концентраций делают логарифмической, игнорируя рост погрешности последующих вычислений по степенной зависимости.

В. Даже корректно построенная многофакторная модель при наличии перекрестных корреляций компонентов смеси на не-

целевые сенсоры имеет существенные ограничения при практическом применении. Например, при контроле предельно допустимых концентраций в салонах автотранспорта необходимо выполнять замеры компонентов смеси выхлопных газов. В состав смеси входят углеводороды одной группы: метан, гексан и формальдегид. Лабораторный химический анализ невозможно обеспечить постоянно во всех местах нахождения автотранспорта. Для постоянного экспресс-анализа селективных сенсоров на каждый компонент группы не существует, сенсор показывает примерно суммарную концентрацию всех компонентов группы. При этом, формальдегид существенно более ядовит, его предельно допустимая разовая концентрация составляет $0,035 \text{ мг/м}^3$, тогда как тот же показатель вредности других компонентов на три порядка больше и составляет для метана 50 мг/м^3 , а для гексана 60 мг/м^3 . Очевидно, что экспресс-анализ газоанализаторами в таком случае неэффективен, так как наличие неопасных концентраций метана и гексана создает непреодолимые помехи для определения опасной концентрации формальдегида.

В поиске оптимальных решений для экспресс-контроля сред автором были проведены исследовательские эксперименты по определению эффективных моделей измерений для решения задач распознавания состава и концентраций смесей, основанных на различного рода допущениях, сокращающих затраты на химический экспресс-анализ, учитывающих современный уровень вычислительной техники, передовых методов обработки измерительной информации, уровень автоматизации пробоподготовки и лабораторных калибровочных процедур, и имеющих практическое значение для экологического мониторинга.

Для определенности будем рассматривать методические подходы к анализу газовой

Таблица 1. Зависимость объема испытаний (количества операций пробоподготовки – N) от количества компонентов смеси k при фиксированном количестве интервалов разбиения диапазонов компонентов m=4.

k	Объем испытаний (количество операций пробоподготовки - N)	
	Полный факторный эксперимент	Подход попарной группировки
2	25	25
4	625	50
6	15625	75
8	390625	100

фазы, которые при известных обобщениях могут использоваться для водного и почвенного секторов.

1. **Мультианалитический подход** [11], ориентированный на перспективные разработки в сфере нанотехнологий и использование возможностей современной вычислительной техники.

2. **Попарная группировка компонентов.** Сложная смесь рассматривается как совокупность двухкомпонентных газов. Предполагается, что каждая пара имеет между собой максимальную корреляцию на целевые сенсоры, однако не вызывает откликов на другие сенсоры газоанализатора. Такое допущение отражает метрологические свойства существующих сенсоров при измерениях реальных газовых смесей. При этом существенно упрощается алгоритм обработки, обеспечивая путем применения одной подпрограммы поэтапное распознавание смеси в процессе перебора пар компонентов. Подход дает значительный экономический эффект за счет сокращения при калибровке газоанализаторов количества трудоемких операций пробоподготовки при создании в газовых камерах комбинаций заданных концентраций компонентов. Зависимость количества операций пробоподготовки N от количества компонентов смеси k и числа интервалов разбиения диапазонов m оценивается формулами комбинаторики:

- для полного факторного эксперимента $N=(m+1)^k$;

- для метода попарной группировки компонентов $N=(k/2) 2^m$, $k = 2,4,6,\dots$

С усложнением состава смеси, при традиционном подходе и фиксированном количестве интервалов разбиения диапазона объем эксперимента растет по степенной зависимости, а при методе попарной группировки – по линейной. Эффект упрощения виден из **таблицы 1.**



Математическая постановка задачи для пары компонентов и пары сенсоров в методе попарной группировки имеет следующий вид.

Пусть зависимость напряжений U_1, U_2 на выходе сенсоров от концентраций компонентов C_1, C_2 описывается системой уравнений:

$$\begin{aligned} U_1 &= A_{11}C_1 + A_{12}C_2 + B_1C_1C_2 + \xi_1 \\ U_2 &= A_{21}C_1 + A_{22}C_2 + B_2C_1C_2 + \xi_2 \end{aligned} \quad (1)$$

где ξ_1, ξ_2 – центрированные случайные величины с нормальным распределением. Области определения концентраций ограничены начальными и конечными значениями диапазонов измерения компонентов:

$$C_1 \in \{C_1^H; C_1^K\}; C_2 \in \{C_2^H; C_2^K\} \quad (2)$$

Коэффициенты $A_{11}, A_{12}, B_1, A_{21}, A_{22}, B_2$ определяются в процессе решения регрессионной задачи при калибровке методом наименьших квадратов.

Уравнения (1) представляют собой две трехмерные параболы. Решение (1) при каждом фиксированном значении напряжений \tilde{U}_1, \tilde{U}_2 на выходе сенсоров отыскивается как координаты \hat{C}_1, \hat{C}_2 пересечения линий секущих плоскостей $U_1 = \tilde{U}_1; U_2 = \tilde{U}_2$ с параболоидами (рисунок 1).

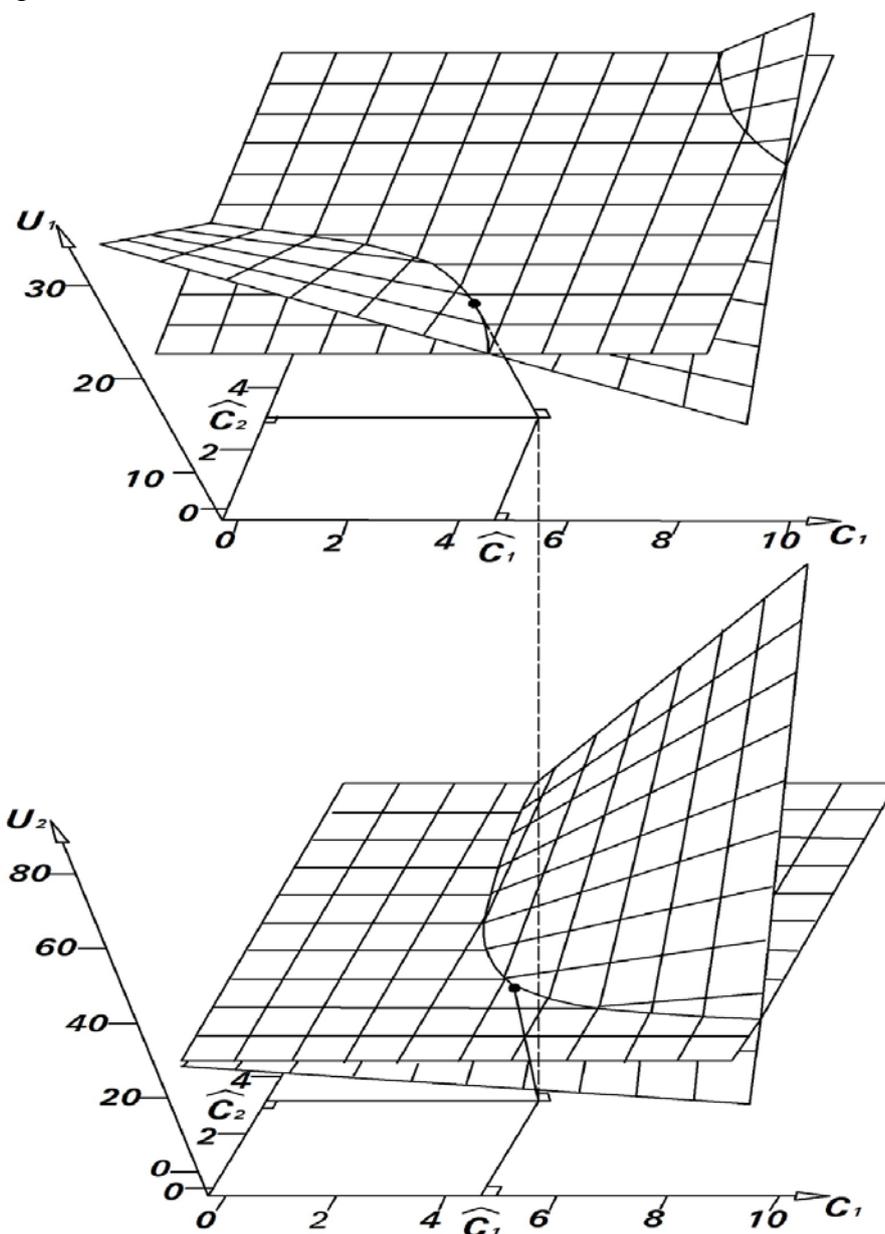


Рисунок 1 - Графическая интерпретация работы алгоритма попарной группировки.

Минимизируемый функционал для решения экстремальной задачи выражается из (1) и представляет собой сумму модулей невязок ξ_1, ξ_2 :

$$Q = |\tilde{U}_1 - A_{11}C_1 + A_{12}C_2 + B_1C_1C_2| + |\tilde{U}_2 - A_{21}C_2 + A_{22}C_2 + B_2C_1C_2| \xrightarrow{\hat{C}_1, \hat{C}_2} \min, \quad (3)$$

Восстановление значений \hat{C}_1, \hat{C}_2 осуществляется численным методом сеток [12]. Также при представлении (3) в виде системы (4) удовлетворительные результаты распознавания газовых смесей дают итерационные методы, например, метод Зейделя [13].

$$C_1 = \frac{-A_{12}C_2 + \tilde{U}_1}{A_{11} + B_1C_2}; \quad C_2 = \frac{-A_{21}C_1 + \tilde{U}_2}{A_{22} + B_2C_1}. \quad (4)$$

Формулы (1-4) могут использоваться для распознавания достаточно сложных смесей, если их компоненты могут быть попарно сгруппированы. Повышение достоверности распознавания смеси можно достичь группировкой одного вещества в пары с несколькими компонентами.

3. Подход распознавания образов.

Применим для калибровочных процедур с высокой степенью автоматизации, например, при использовании программируемых генераторов газовых смесей, из-за трудоемкости и большого объема калибровочных испытаний. Преимуществом подхода является отсутствие необходимости построения аналитической модели измерений.

Задача решается в два этапа.

А. Выполняется обучение интеллектуальной системы (5),

$$U = F(\Omega\{S, C\}) + \xi, \quad (5)$$

заключающееся в формировании массива выходных электрических сигналов N датчиков $U^{np} = \{U_i\}, i = 1, N$ при генерации прототипов $\Omega\{S, C\}$, где F – оператор связи; U^{np} – вектор напряжений, характеризующих прототипы; Ω – генератор комбинаций смесей; S – структурный вектор смеси, характеризующийся набором компонентов; C – вектор концентраций компонентов.

Б. По текущему значению наблюдаемого вектора \tilde{U} устанавливается принадлежность

состояния системы к ближайшему прототипу. Признаком принадлежности является минимум меры:

$$\mu = |U^{np} - \tilde{U}| \xrightarrow{s.c} \min \quad (6)$$

Выбор меры (6) применим для ограниченного набора смесей из-за его неоднозначности – один и тот же результат может быть обусловлен одинаковыми приближениями к существенно различным прототипам.

4. **Подход распознавания образов с визуализацией данных.** Является развитием автором предыдущего подхода путем применения карт Кохонена [14]. Повышение достоверности распознавания по сравнению с предыдущим обусловлено более корректной организацией обучения интеллектуальной системы и применения критерия, обеспечивающего построение областей, графически отображающих текущее состояние смеси. Критерий позволяет численно оценить близость текущего состояния системы $\Omega\{S, C\}$ к опорным областям, определенным при калибровке. Визуализация достигается следующими приемами:

- понижением размерности ($N \times N$)-мерного пространства (N компонентов, N сенсоров, $N > 3$) путем проецирования его в двухмерную карту Кохонена с набором из $N-1$ объектов, представляющих собой сочетание попарных комбинаций выходных сигналов сенсоров $\{U_{i+1}(U_i)\}, i = 1, N-1; U_i \in \{0...1\}$.

- проецирование двухмерной карты Кохонена с набором из $N-1$ объектов в один двухмерный объект, представляющий собой систему координат, по оси абсцисс которой откладываются нормированные значения выходных сигналов нечетных номеров датчиков, по оси ординат – четных.

Полученный объект сохраняет топологию прообраза, а его интерпретация дает следующие потенциальные возможности:

- обнаружение групп объектов с одинаковыми характеристиками (кластеров);
- дискриминация несущественных признаков;
- детальная спецификация кластеров по тестовым изменениям вектора входных воздействий при калибровке;



- выявление неявных связей и закономерностей между признаками;
- проведение оценки объектов в динамике;
- нанесение на карту новых объектов;
- прогнозирование значений одних признаков объектов через другие;
- фильтрацию объектов за счет модификации критериев.

Решение задачи распознавания смеси выполняется в следующей последовательности.

А. Обучение интеллектуальной системы в соответствии с подходом №3.

Б. Нормировка данных. Данные, подлежащие обработке должны иметь числовой тип, а их значения должны быть распределены в определенном диапазоне. Нормализатор масштабирует дискретные данные к набору значений, лежащих в диапазоне $\{0..1\}$ путем деления каждой компоненты вектора выходных сигналов на нормирующее значение.

В. Составление $N-1$ попарных сочетаний нормированных значений выходных напряжений, представляющих собой набор двухмерных графиков (рисунк 2):

$$\{U_{i+1}(U_i)\}, i = 1, N-1; U_i \in \{0..1\}. \quad (7)$$

В соответствии с (5) любая точка (u_i, u_j) в системе координат (7) имеет прообраз (c_i, c_j) , и характеризует соотношение концентраций ij -й пары компонентов.

Г. Свертка $N-1$ двухмерных графиков (7), на каждом из которых m точек, характеризующих состояния - в m двухмерных систем координат, на каждой из которых будут располагаться только масштабированные координаты напряжений, характеризующие одно состояние смеси.

$$\{U_{2,4,6..}(U_{1,3,5..})\} \quad (8)$$

По оси абсцисс отложены все нечетные датчики, по оси ординат – четные. Полученное таким образом на одном графике множество точек, упорядоченно соединенных между собой, обеспечивает визуализацию образа фиксированного состояния смеси и изменяется при изменении состояния смеси $\Omega\{S, C\}$.

Д. Выделение существенных признаков образов отдельных состояний, обеспечивающих с требуемой достоверностью идентификацию состояния смеси.

Е. Преобразования (7,8) вектора \tilde{U} текущих координат выхода измерительной системы для приведения сравниваемых образов к одному контексту.

Ж. Распознавание смеси путем определения максимального совпадения образов текущего и калибровочных значений посредством минимизации некоторого критерия $\Delta = \min$.

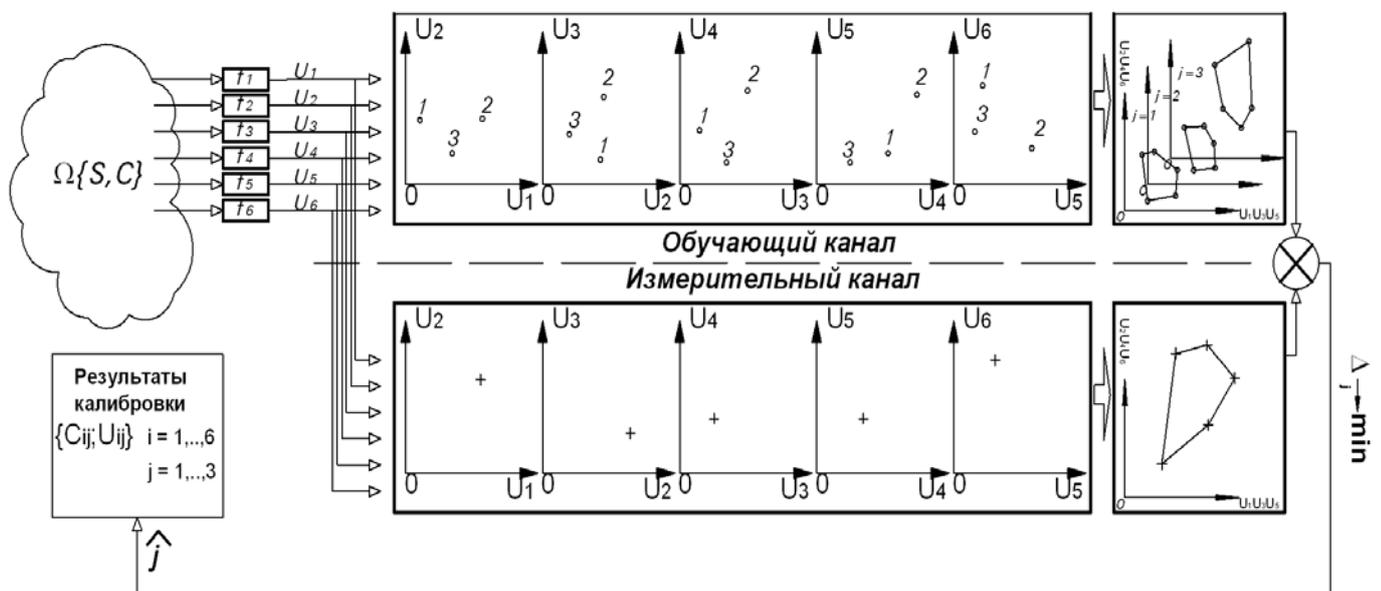


Рисунок 2 - Решение задачи газового анализа смеси методом распознавания образов.

5. Подход нейронных сетей.

В основе подхода лежит идея использования набора взаимосвязанных простых элементов - формальных нейронов. Необходимая сложность, иерархичность, адаптивность и надежность нейронной сети достигаются характером связей между нейронами. Структура нейронной сети определяется видом решаемой задачи. Нейронная сеть заданной структуры может быть использована только после обучения, в процессе которого на вход сети подаются известные данные концентраций, воспроизводимые эталонами - государственными стандартными образцами. В газовой камере находится смесь компонентов фиксированных концентраций, которая после многократных преобразований отображается в вектор выходных сигналов.

Преимуществом при использовании нейронных сетей является отсутствие необходимости построения строгих калибровочных характеристик изначально неселективных сенсоров.

Простейший случай практического использования нейронных сетей обратного распространения для решения экологических задач описан в [15].

Более сложная нейронная сеть Такаги-Сугено-Канга (TSK) - нейронная сеть на базе модели нечеткого вывода Мамдани-Заде предложена в [16]. Применительно к сети TSK значение четкой функции заключения может быть интерпретировано как точечная оценка математического ожидания концентрации i -го компонента, значение нечеткой функции принадлежности определяет доверительный интервал нахождения истинного значения измеряемого параметра с заданной доверительной вероятностью, а процедура обучения нейронной сети может рассматриваться как калибровка устройства распознавания смеси.

Предлагаемая нейронная сеть (рисунок 3), разработанная автором на базе модели TSK, состоит из обучающего и измерительного каналов. Источниками обучающей информации являются:

- набор эталонов - государственных стандартных образцов (ГСО), воспроизводящих с достаточной точностью значения концентраций веществ;

- генератор смесей $\Omega\{C^1, C^2, \dots, C^N\}$, воспроизводящий комбинации концентраций компонентов по заданной программе.

Разработанная система позволяет аппроксимировать зависимость выходного слоя сети - оценок концентраций компонентов смеси $\hat{C} = [\hat{c}_1, \hat{c}_2, \dots, \hat{c}_N]^T$ от неизвестного вектора концентраций $C = [c_1, c_2, \dots, c_N]^T$ по наблюдаемому вектору $U = \{U_1, U_2, \dots, U_N\}^T$ выхода сенсоров.

Нейронная сеть состоит из пяти слоев и реализует систему с нечеткой логикой на основе импликаций вида:

$$\text{если } x \text{ это } A, \text{ то } y \text{ это } B \quad (9)$$

где A и B - лингвистические переменные, определяемые нечетким способом через функции принадлежности для переменных x и y , причем « x это A » называется предпосылкой, а « y это B » - следствием.

Комбинации бинарных логических связей (9) определяют вытекающее из них заключение, называемое нечетким рассуждением и записываемое в виде:

$$\begin{aligned} &\text{если } U_1 \text{ это } A_1 \text{ И } U_2 \text{ это } A_2 \dots \\ &\dots \text{ И } U_N \text{ это } A_N, \text{ то } C \text{ это } B. \end{aligned} \quad (10)$$

Нейронная сеть относится к нечеткому типу, в которой показания сенсоров сначала преобразуются в нечеткий формат - фуззифицируются, затем подвергаются процедурам алгебры логики, затем дефуззифицируются и в виде вектора точных значений являются искомыми оценками концентраций компонентов смеси. Для нейронной сети, разработанной на основе модели TSK (10), можно записать в виде:

$$\begin{aligned} &\text{Если } (U_1 \text{ это } A^1_1 \text{ И } U_2 \text{ это } A^1_2 \dots \text{ И } U_N \text{ это } A^1), \text{ то } C_1 = f^1(U_1, U_2, \dots, U_N) \\ &\text{Если } (U_1 \text{ это } A^2_1 \text{ И } U_2 \text{ это } A^2_2 \dots \text{ И } U_N \text{ это } A^2), \text{ то } C_2 = f^2(U_1, U_2, \dots, U_N) \\ &\text{Если } (U_1 \text{ это } A^N_1 \text{ И } U_2 \text{ это } A^N_2 \dots \text{ И } U_N \text{ это } A^N), \text{ то } C_N = f^N(U_1, U_2, \dots, U_N) \end{aligned} \quad (11)$$

Возможность получения точечных оценок без операции дефуззификации объясняется строгостью правой части системы (11).

Первый слой, сенсорный, с неизвестными функциями преобразования сенсоров g_i , $i=1, N$. Это физический слой, выход которого - вектор электрических сигналов U , откликов неселективных сенсоров на различные состояния смеси.



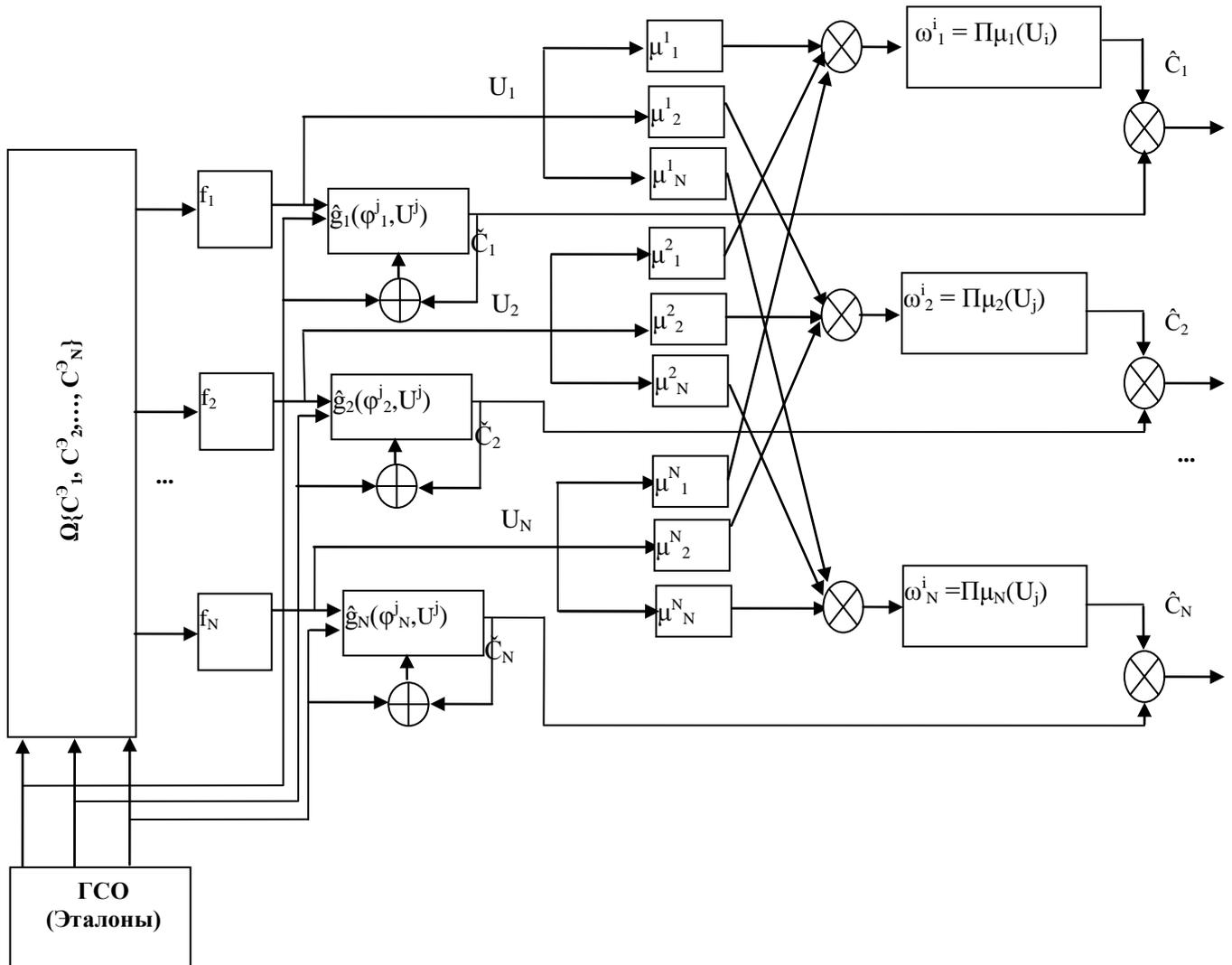


Рисунок 3 - Нейронная сеть TSK для распознавания газовых смесей.

Вторым является слой параметрической идентификации калибровочных характеристик сенсоров. Классическое представление j -й калибровочной характеристики имеет вид полинома первого порядка:

$$C^j = \hat{g}(\varphi^j, U_i) + \psi = \varphi^j_0 + \varphi^j_1 U_1 + \varphi^j_2 U_2 + \dots + \varphi^j_N U_N + \psi^j; \quad i, j = 1, N \quad (12)$$

Линейные веса функции следствия сети φ подбираются минимизацией невязки:

$$|C^j - g(\varphi, U)| \xrightarrow{\varphi} \min \quad (13)$$

В процессе обучения сети (13) выводится подстановкой в (12) эталонных значений C^j .

Третьим является слой фузификации переменных [17]. Его назначение состоит в преобразовании вектора точечных оценок выходных сигналов сенсорного слоя $U =$

$\{U_1, U_2, \dots, U_N\}^T$ в нечеткое множество $A \subseteq U = U_1 \times U_2 \times \dots \times U_N$.

Слой содержит $N \times N$ узлов, каждый из которых реализует расчет функции Гаусса:

$$\mu^A_{ij} = \frac{1}{1 + \left(\frac{(U_i - m_{ij})}{s_{ij}} \right)^{2b_{ij}}}; \quad i, j = 1, N. \quad (14)$$

В контексте решаемой задачи по своей физической сущности μ^A_{ij} является вероятностной моделью функций преобразования сенсоров, и представляет собой совокупность распределений откликов i -го сенсора на j -й компонент.

Слой является параметрическим, так как его параметры m_{ij} , s_{ij} и b_{ij} на этапе обучения сети подлежат подбору методами градиентного спуска.

Четвертый - слой агрегирования переменных, определяющий результирующие значения коэффициентов принадлежности:

$$\omega_k = \mu^A_{ij}(U_k); \quad i, j, k = 1, N, \text{ где} \quad (15)$$

$$\mu^A_{ij}(U_k) = \prod_{j=1}^N \left[\frac{I}{I + \left(\frac{U_i - m_j^{(k)}}{s_j^k} \right)^{2b_j^k}} \right] \quad (16)$$

Веса ω_k интерпретируются как количественная оценка вероятности присутствия k -го компонента в смеси.

Изменение логики вывода в соответствии со спецификой решаемых задач достигается изменением уровней активации переменных, выполняемое подстановкой вместо алгебраического произведения (16) логических функций - \min , \max , \sup и других, из набора модели Мамдани-Заде как универсального аппроксиматора [18].

Пятый слой определяет уровень активации правила вывода для k -го компонента смеси путем умножения значений предварительных оценок концентраций \check{C}_k , полученных на выходе второго слоя, на коэффициент принадлежности ω_k .

Выходная функция сети описывается линейной относительно всех переменных U_j для $j=1, 2, \dots, N$ формой:

$$\hat{C}(U) = \sum_{i=1}^N \frac{\omega_i}{\sum_{j=1}^M \omega_j} \left(\varphi_{j0} + \sum_{j=1}^N \varphi_{ij} U_j \right) \quad (17)$$

В выражении (17) веса ω_i соответствуют условию нормализации: $\sum_{i=1}^N \frac{\omega_i}{\sum_{j=1}^M \omega_j} = 1$. (18)

Приведенные подходы могут способствовать реализации стратегических целей отечественных предприятий ОПК по повышению эффективности системного экологического мониторинга, совершенствованию научно-технического обеспечения защиты окружающей среды на основе современных методов измерений и средств обработки измерительной информации, а также улуч-

шить технологическую оснащенность органов государственной власти, уполномоченных для проведения мероприятий по реализации целевых программ в области охраны окружающей среды.

Список использованных источников

1 Материалы парламентских слушаний в Государственной думе "Вопросы совершенствования нормативного правового регулирования в области обеспечения экологической безопасности при обращении с отходами производства и потребления", доклад председателя комитета Государственной думы РФ по природным ресурсам, природопользованию и экологии Н.Комаровой, от 24.03.2009 г.

2 Основные положения Федеральной системы обязательной экологической сертификации. Утверждены председателем Государственного комитета Российской Федерации по охране окружающей среды 22.12.97.

3 ГОСТ 24525-80. Управление производственным объединением и промышленным предприятием. Управление охраной окружающей Среды. Основные положения.

4 ГОСТ Р ИСО 14001-2007 «Системы экологического менеджмента. Требования и руководство по применению».

5 ПР 50.2.018-95. Порядок проведения испытаний и утверждения типа средств измерений.

6 ПР 50.2.014-2002 ГСИ. Правила проведения аккредитации метрологических служб юридических лиц на право поверки средств измерений.

7 ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002 - ГОСТ Р ИСО 5725-6-2002 под общим заголовком «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений».

8 ISO 14001. Системы менеджмента окружающей среды. Требования и руководство по применению.

9 Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979, изд. 2-е.

10 Чубуков Н.Н. Повышение качества измерений за счет усовершенствования методики градуировки измерительных каналов информационно-измерительных систем.

//Материалы XXIV конференции молодых ученых и специалистов «Военная метрология XXI века», 32 ГНИИ, 1999 г., 5 с.

11 Шмурнов Е.А., Николаев Ю.Н., Чубуков Н.Н. Использование мультинаносенсорного подхода для повышения экологической безопасности и обитаемости военной автомобильной техники. Вооружение и экономика №4(8) 2009.

12 Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З. Численные методы анализа. М.: Государственное издательство физико-математической литературы. 1962. - 368 с.

13 Хемминг Р.В. Численные методы. – М.: ГРФМЛ, 1972.

14 Т. Кохонен. Самоорганизующиеся карты. Серия: Адаптивные и интеллекту-

альные системы. Издательство: Бинوم. Лаборатория знаний, 2008 г.

15 Круг П.Г. Нейронные сети и нейрокомпьютеры: Учебное пособие по курсу «Микропроцессоры». – М.: Издательство МЭИ, 2002. – 176 с.

16 Осовский С. Нейронные сети для обработки информации. - М.: Финансы и статистика, 2004. - 344с.

17 Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: Пер. с польского И.Д. Рудинского. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.: ил.

18 Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. – М.: Мир, 1976.

