

# СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И УПРАВЛЕНИЕ

УДК: 57.007 ; 004.8.032.26

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОДДЕРЖКИ РЕШЕНИЙ ДЛЯ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ПОВЫШЕННОГО РИСКА

**С.П. АЛЁШИН  
АЛ. ЛЯХОВ  
ЕАБОРОДИНА**

*Полтавский национальный  
технический университет  
имени Юрия Кондратюка*

*e-mail:  
aleshsp@ukr.net  
LAL@pntu.edu.ua  
lena\_borodina@ukr.net*

Работа посвящена проблеме разработки теоретических и прикладных основ построения автоматизированных интеллектуальных систем принятия решений для систем безопасности критических инфраструктур или объектов повышенного риска. Предложена нейросетевая технология анализа информативности входных признаков, описывающих угрозы, реализации решающих правил распознавания классов опасности на основе обучаемых классификаторов и адаптации набора входных факторов к требуемому (допустимому) уровню ожидаемого ущерба. Представлены функциональные схемы базовых функций принятия решений и результаты откликов обученных моделей классификации и прогнозирования на массивах экспериментальных данных.

Ключевые слова: классификатор, адаптация, прогноз, нейронная сеть, обучающая выборка, матрица ущерба, риски, обучение нейронной сети.

### **Введение**

В совокупности все процедуры, которые обеспечивают принятие решений, позволяют создать высокопродуктивный программный комплекс, осуществляющий моделирование сложных объектов и управление их динамикой. Необходимо лишь формализовать и раскрыть вопросы организации взаимодействия человека и компьютера, инструментально организовать управление данными и знаниями, а также визуализировать результаты расчетов. Конвертация разработанной технологической базы в единый комплекс данных, вычислительных методов, алгоритмов, моделей и программных комплексов компьютерного моделирования (пакетов технического анализа) позволяет построить систему поддержки решений, чтобы принимать оптимальные решения в реальном времени динамики процессов конкретной предметной области.

Система поддержки принятия решений для системы безопасности объектов повышенного риска (СППР СБОПР) - это база данных, алгоритмическая, программная и техническая среда, позволяющая оперативно формировать модели классификации, про-

гноза и адаптации входных факторов, которые позволяют относить ситуацию к определенному классу, предсказывать значения выходных индикаторов и устанавливать соответствие набора входных факторов наборам индикаторов выходных состояний. Эти данные в реальном времени поступают лицу, принимающему решения (ЛПР).

#### **Задачи СППР СБОПР:**

- автоматизированный мониторинг состояния объекта управления с прогнозированием развития ситуации на основе анализа поступающей информации;
- моделирование последствий управленческих решений, на базе использования нейросетевых моделей и информационно-аналитических систем;
- экспертная оценка принимаемых решений и их оптимизация;
- управление в кризисной ситуации.

Минимальные затраты времени при допустимой надежности решений актуальны в кризисных ситуациях и для критических инфраструктур [2,3,7]. В первом случае это решения, которые продуктивны лишь на ограниченном интервале времени (управление динамическими объектами, реакция на кризисные ситуации), во втором - недопустимые риски в критических инфраструктурах (АЭС, угольная шахта, система предупреждения о нападении и др.). В этом случае объект исследования сохраняет все атрибуты сложной системы, но меняется соотношение приоритетов в показателях продуктивности, что приводит к изменению структуры, взаимодействия и качества разрабатываемой СППР. На рис.1 схематично отображена проблема противоречия трех атрибутов принятия решений: ошибки обучения модели, риска от принятого решения и текущего времени. Пояснения здесь просты и наглядны.

1 г		
б		5R
\$ <		

Рис. 1. Иллюстрация противоречий атрибутов решений в СППР СБОПР

Ошибка обучения со временем в целом монотонно убывает со скоростью, которую позволяют обеспечить заданные условия и особенности предметной области ОПР. Риск от принятого решения существенно зависит от времени его принятия по определению, так как несвоевременность его исполнения может быть равнозначна его отсутствию. Поэтому необходимо, используя формализацию, алгоритмы и модели реализации базовых процессов в СППР СБОПР, построить продуктивные алгоритмы их применения, таким образом, чтобы исключить принятие решений в области неприемлемых ошибок и чрезмерных рисков (области 1,2 на рис.1.). Следовательно, в основе решения построения продуктивной СППР СБОПР лежит алгоритм поиска компромисса в пространстве противоречивых атрибутов при заданных общих ограничениях.

#### **Формализация задачи**

Особенностью функционирования критических инфраструктур следует считать высокую зависимость общего результата от отдельного базового процесса. Например, несвоевременное распознавание предельной концентрации угольной пыли или метана в шахте, может привести к взрыву и свести к нулю оптимизацию добычи или транспортировки угля. А несвоевременная адаптация входного вектора управляющих факторов может не позволить удерживать индикаторы безопасного уровня производства в допустимых пределах. Следовательно, для СППР СБОПР целесообразно базовые

процессы формализовать и моделировать с максимальной степенью самостоятельности и рассматривать результат как решение отдельного эксперта. Это позволит найти оптимальное решение быстрее, так как не требует поиска компромисса с продуктивностью других процессов. С учетом сказанного, представляется целесообразным реализовать модели СППР СБОПР как совокупность автоматических экспертов процессов распознавания состояний, прогноза тенденций к изменению состояний объектов, адаптацию управляющих факторов к целевому состоянию объекта исследования. С учетом этих ограничивающих условий задача моделирования принятия решений в управлении СБОПР формализуется выражением:

$$\min R(AT)(S, P, X)$$

$$\text{при } \delta^d \leq \delta_0^d, \quad D)$$

Где  $S$  - множество распознаваемых (ситуаций) состояний ОПР;

$P$  - множество прогнозов значений индикаторов состояний ОПР;

$X$  - множество входных факторов ОПР;

$AT, D$  - интервал времени принятия решения по каждой задаче и степень адекватности модели;

$R(AT)$  - ожидаемый ущерб от задержки принятия решения на время  $AT$  ;

$\delta_0$  - допустимые ошибки обучения моделей, ожидаемый ущерб от степени неадекватности модели;

Таким образом, решение задачи вида (1) решается отдельно для каждого предиктора ( $S, P, X$ ) по отдельности, что позволяет реализовать декомпозицию общей задачи и построить ансамбль моделей для принятия решений в каждом классе задач (распознавание, прогноз, адаптация входов к желаемому выходу).

### **Структура и принцип функционирования СППР СБОПР**

Концепция СППР СБОПР определяет принципы построения аналитической среды в формате баз данных, моделей, методов и алгоритмов [2, 3, 4, 7]. Кроме отмеченных базовых процедур, должна быть обеспечена актуализация базы данных в реальном времени, а также верификация результата и его предоставление конечному пользователю в доступной интерпретации. Преимущества такого подхода перед традиционными представлениями о программных комплексах при обеспечении поддержки решений в обслуживании критических инфраструктур (как совокупности расчетных модулей, библиотек и соответствующей программной документации) состоят в следующем:

- в рамках СППР СБОПР формализуются в форме программных кодов модели, методы, вычислительные алгоритмы и экспертные знания об исследуемом процессе на базе нейроэмуляторов;

- СППР СБОПР предоставляет совокупность относительно самостоятельных модулей, взаимодействующих между собой в режиме как автоматического, так и интерактивного управления ЛПР с доминированием первого;

- СППР СБОПР изначально ориентирован на поддержку высокопроизводительных вычислений на базе традиционных ПК с модулем нейроэмуляторов в ПО, способных формировать отдельные приложения на различных платформах.

Принципиальным аспектом разработки СППР является выбор парадигмы интеграции его компонентов, которая отвечает тенденции снижения стоимости и сложности процессов разработки моделей, их верификации и поддержки программных продуктов на фоне увеличения общей сложности решаемых задач.

Организацию СППР СБОПР можно условно представить блоком анализа данных и принятия решений (БАД и ПР) (рис. 2), в формате трех базовых подсистем (рис. 3). Это относительно самостоятельные программные модули, представляющие подсистему классификации состояний (рис. 4), подсистему прогноза динамики выходных индикаторов состояний (рис.5) и подсистему адаптации входных факторов к целевым состояниям



(рис. 6), компоненты которых могут взаимодействовать друг с другом на основе взаимосвязанных задач общего замысла функционирования СППР СБОПР.

### ***Структурные элементы СППР СБОПР, их построение и функции***

Если формальное представление БАД и ПР распространить, например, на систему безопасности угольной шахты, то результат интерпретации можно представить в адекватной форме, включающий подсистему вычисления комплексных показателей уровней безопасности, подсистему прогноза и выбора превентивных мер, подсистему принятия решений и выдачи команд. Для предметности изложения используем описание абстрактной СППР на формальном языке информативных признаков и состояний данной отрасли.

Угольная шахта - классический пример критической инфраструктуры как сложного производственного объекта с опасными условиями эксплуатации, вызванными случайными изменениями геофизических природных условий, отказами техники, нарушениями технологии и правил безопасного ведения горных работ. Любой из этих факторов может привести к катастрофическим последствиям, человеческим жертвам и материальному ущербу, поскольку добыча угля, как правило, ведется на большой глубине (более 1000 метров) в условиях высокой загазованности слоев метаном, угольной пылью и другими газами [8].

В настоящее время не теряет актуальности задача построения эффективной системы обеспечения безопасности производственного процесса с максимальной степенью автоматизации базовых процедур: классификации состояний безопасности, прогноза их динамики и выбора превентивных мер снижения рисков [2, 3, 4, 7]. При этом в шахте предусмотрен мониторинг параметров шахтной атмосферы, параметров горного массива, параметров технологического процесса в режиме реального времени [8]:

- физические параметры шахтной атмосферы в разных участках шахты (температура, концентрация газов CO, CO<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>, скорость движения воздуха и др.);
- показания датчиков индикации пожаров;
- данные свойств горного массива в непосредственной близости от мест добычи угля, полученной на базе акустического зондирования массива;
- формализованные описания текущих локальных и обобщенных показателей безопасности, с установлением уровней рисков как классов состояний безопасности на языке измеряемых массивов признаков (соотношение номера класса значениям элементов массива входных факторов);
- априорные вероятностные характеристики уровней опасности (наиболее опасные места, связанные с выбросами угля или породы, самые опасные места по выбросу метана, наиболее пожароопасные места, самые опасные места с позиций загазованности атмосферы, вероятность обвала кровли и др.);
- о показания датчиков текущих значений физических параметров технологического оборудования.

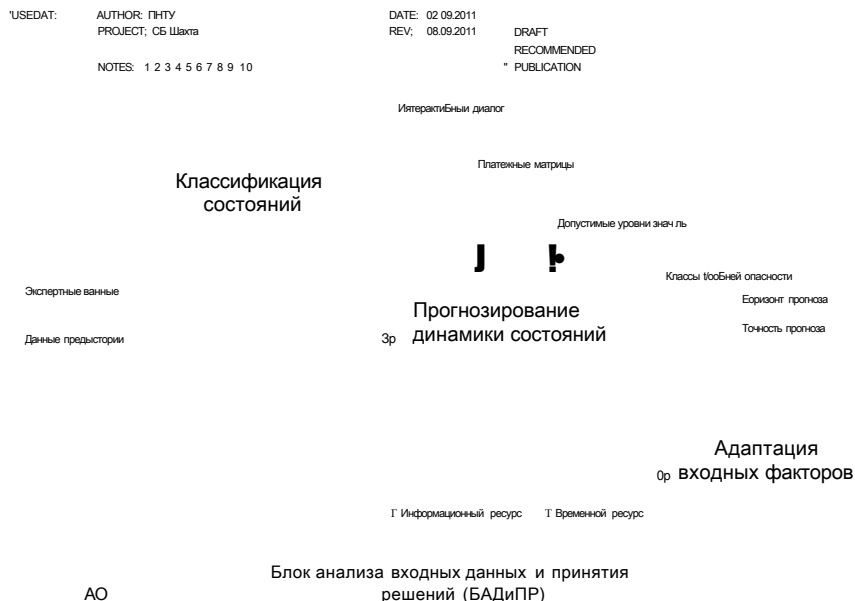
Наличие этих данных позволяет построить продуктивные нейросетевые модели базовых процедур принятия решений в системе безопасности шахты.

Сегодня задача анализа данных, классификация уровней безопасности и принятие решений возложена на диспетчера (ЛПР) и, как показывает практика, представляет чрезмерную нагрузку, так как именно эти действия не автоматизированы. Покажем возможность автоматизации этих процедур.



**А-О** **Т** Блок анализа входных данных и принятия решений (БАДиПР)  
*Рис. 2. Блок анализа данных и принятия решений*

Исходя из принятой структуры построения системы безопасности (рис. 2) выделим и раскроем функции блока анализа входных данных и принятия решений. БАД и ПР - компьютерная система для контроля и управления безопасностью производственного процесса угольной шахты, предназначенная для непрерывного автоматического сбора информации о текущих значениях показателей безопасности с датчиков и состоянии технологических объектов (горношахтного оборудования, аэрологического окружения, горного массива и других технологических цепей горного производства), прогноза возникновения разных видов опасностей (взрывоопасности, пожароопасности, аварий и т.п.), управления состояниями вариацией входных факторов, а также для накопления, обработки, отображение информации, для подачи команд аварийным службам. Функции блока разделены на три относительно самостоятельных модуля (рис. 3), решающих задачи распознавания уровней безопасности, прогнозирования динамики состояний и активное воздействие на состояния вариацией входными факторами.



**АО** Блок анализа входных данных и принятия решений (БАДиПР)  
*Рис.3. Модули блока БАДи ПР*

Распознавание ситуаций реализуется на базе пакета технического анализа по алгоритму, представленному схемой (рис. 4). При выборе типов моделей, структур и режимов, методов обучения и условий классификации, используется математический, алгоритмический и программный инструментарий приведенный в [1, 5].

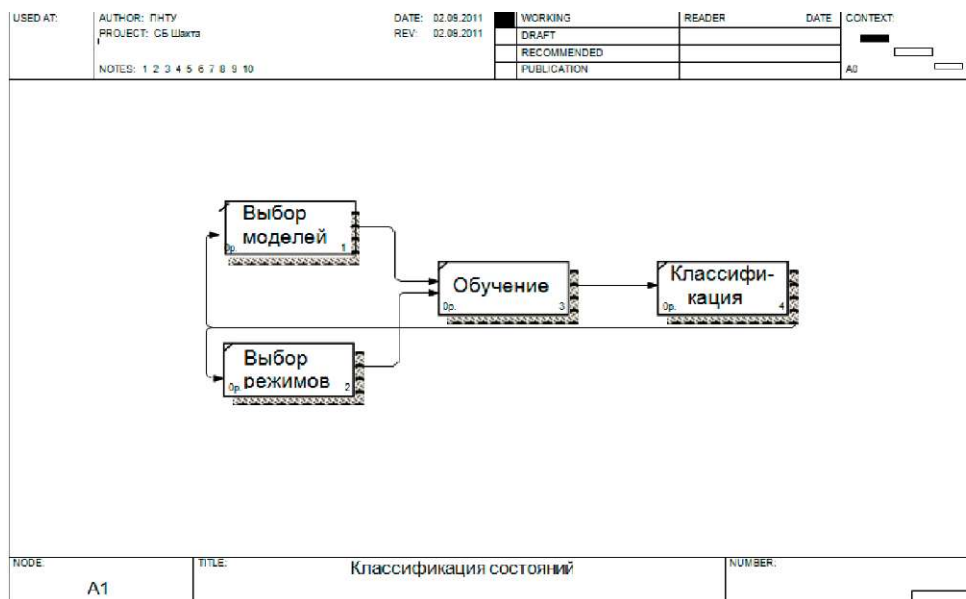


Рис. 4. Процедуры классификации состояний

Прогнозирование динамики уровней опасности основывается на проведении многомерного регрессионного анализа (рис. 5). Все процедуры формализованы и их представлены в [2, 3, 4, 7]. Так как для данного примера имеется большое количества разнородных данных, то предшествовать регрессионному анализу должен кластерный анализ (рис. 6). По его завершению для данных каждого из кластеров строится отдельная нейронная сеть многомерной регрессии [1, 4]. Результатом достижения требуемой однородности во входных данных является выдача отобранных подмассивов данных из общего массива с присвоением каждому номера класса.

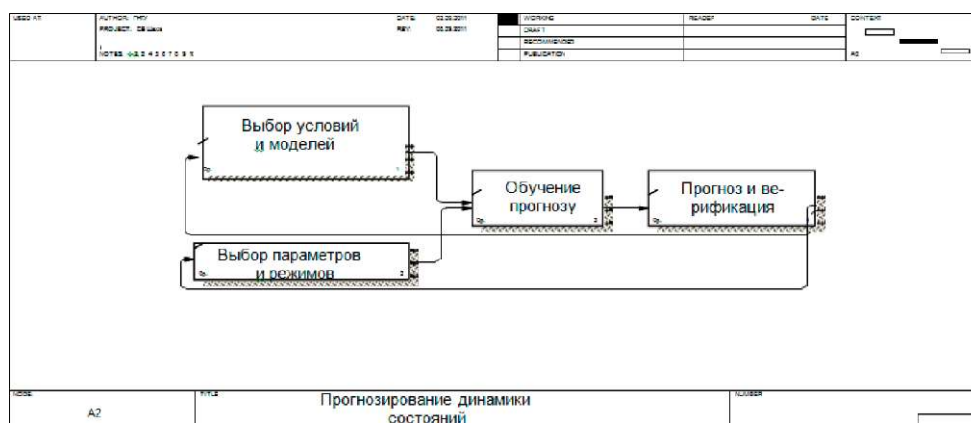


Рис. 5. Процедуры прогнозирования уровней опасности

Адаптация входных факторов к желаемым изменениям уровней опасности предполагает вариации элементами входного вектора данных на основе оценки градиента ошибки по входным параметрам при обратном распространении ошибки. Это позволит минимизировать время выбора входных параметров для оперативного влияния на уровни опасности. Основные этапы адаптации входных факторов к желаемому состоянию

безопасности представлены рис. 7, а их алгоритмическая реализация обоснована в работах [2, 4, 7].

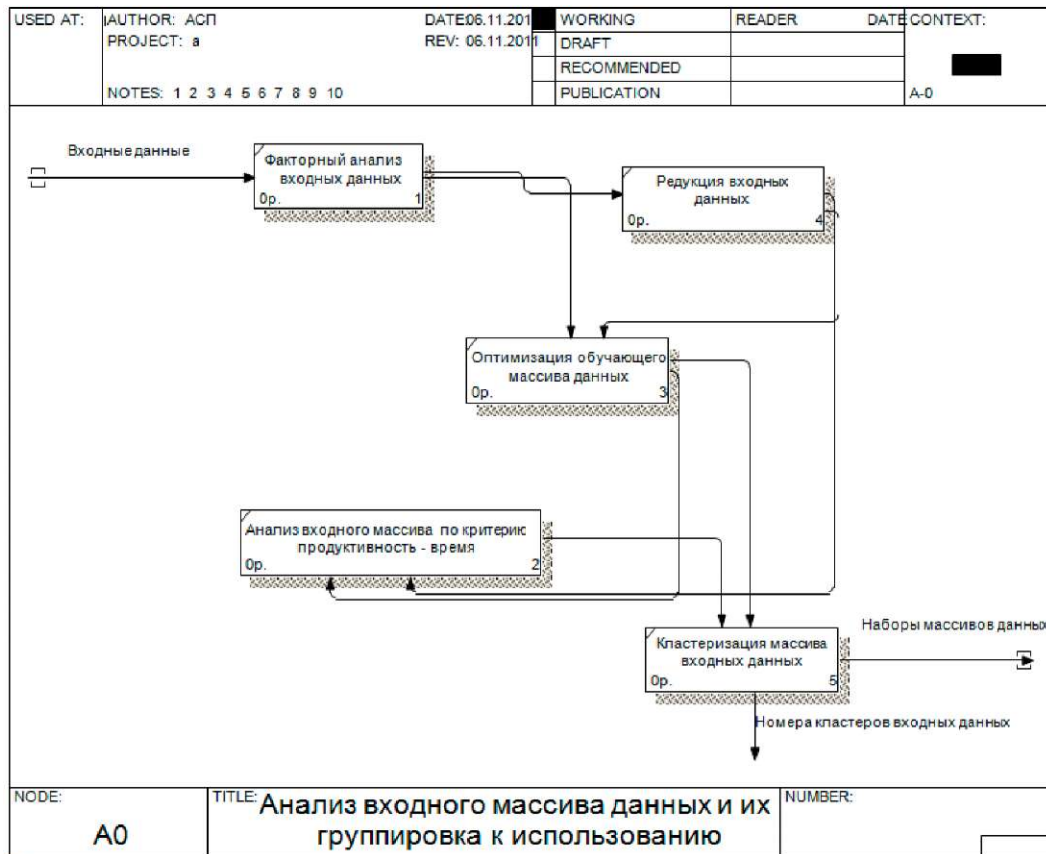


Рис. 6. Процедуры кластерного анализа входных данных

Решив задачу кластерного анализа и многомерной регрессии, можно переходить к задаче адаптации входных факторов по разработанному алгоритму (рис. 7). Содержание процедур и их модели представлены в [3, 4, 7].

Основу математического сопровождения моделирования составляют процедуры вычисления производных выходной функции невязки текущего и требуемого состояний безопасности по векторам индикаторов этих уровней с минимальными затратами времени. Методика и модели инструментального решения данной задачи приведены для практического использования на основе известных свойств двойственных нагруженных нейросетевых моделей [4, 5].

Выбор значений входных факторов как результат адаптации их к желаемым изменениям уровней опасности и является необходимой информацией для принятия решений ЛПР. Если у него есть набор сценариев реакции на тот или иной класс уровня безопасности, их динамику и адаптацию входных признаков, то время реакции будет минимальным.

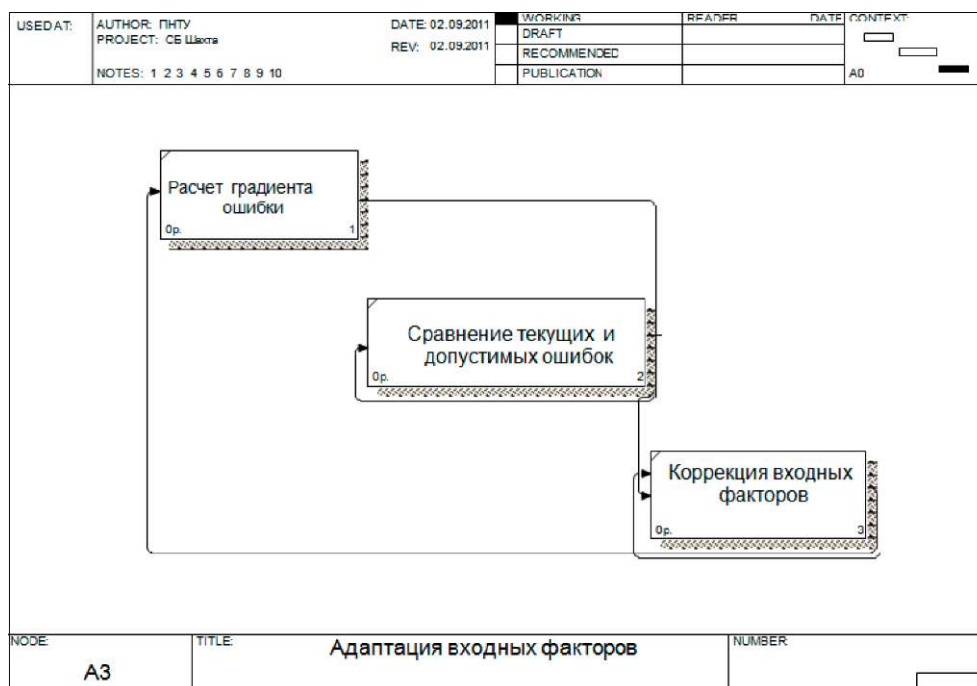


Рис. 7. Этапы адаптации входных факторов к желаемому состоянию

Таким образом, в рамках проекта СППР СБОПР для продуктивного решения ЛПР выполняются следующие процедуры:

- 1) формирование обучающего множества сценариев, моделирования и верификации результатов;
- 2) назначение имен классов / ситуаций распознаваемых объектов;
- 3) выбор репрезентативных представителей для каждого класса из множества объектов обучающего множества;
- 4) анализ обучающего множества с целью установления характерных особенностей признаков каждого из классов классифицируемых объектов;
- 5) выбор метода моделирования, типов сетей, способов их обучения, начальных параметров и установок для инициализации;
- 6) формирование эталонных моделей каждого класса/ситуации и базы данных моделей, с которыми в процессе классификации будет осуществляться автоматическое сравнение моделей эталонов с текущими наборами признаков;
- 7) выбор и определение мер близости для сравнения эталонных моделей, хранящихся в БД системы, с моделями, формируемыми автоматически для каждой из распознаваемых ситуаций;
- 8) выбор правил для автоматического формирования моделей распознаваемых ситуаций;
- 9) анализ качества моделей, выбор наиболее продуктивных и коррекция данных, параметров, критериев, верификация результатов;
- 10) прогнозирование динамики уровней опасности предполагается провести на основе многомерного регрессионного анализа;
- 11) адаптация входных факторов к желаемым изменениям уровней опасности вариацией элементами входного вектора данных и применением градиентного метода в формате нагруженных двойственных сетей.

Следовательно, блок анализа данных и принятия решений в общей функциональной структуре системы СППР на примере фрагмента общей системы безопасности угольной шахты, реализуется на базе известных нейросетевых моделей, методов их обучения с применением стандартных пакетов технического анализа. Это позволит использовать программную оболочку эмуляторов нейросетевых моделей на обычных ПК, что существенно снижает время и затраты на моделирование.



Таким образом, построение СППР СБОПР, реализуемого на базе достижений искусственного интеллекта в формате математического и алгоритмического инструментария модулей нероэмуляторов, позволяет расширить традиционные подходы к обработке информации, дополнить их новыми подходами, моделями и алгоритмами поддержки принятия решений с учетом критичности объектов, дефицита времени, многофакторности и, в целом, высокой неопределенности и неполноты исходной информации. Расширяя функциональные возможности традиционных аналитических систем и повышая эффективность решения поставленных задач, СППР СБОПР позволяет обеспечить новое качество - способность классификации, предсказания критических и аварийных ситуаций, оперативной реакции, что особенно важно при реализации в сложных вычислительных комплексах обработки информации.

### **Выводы**

1. Разработанный методический, алгоритмический и программный инструментарий позволяет автоматизировать базовые процессы принятия решений для критических инфраструктур в формате интеллектуальных СППР.

2. Моделирование и интерпретация результатов на платформе нейроэмуляторов — эффективное средство и инструмент автоматизации принятия решений управления в реальном времени для критических инфраструктур. В основе построения продуктивной СППР системы безопасности шахты лежат алгоритмы поиска компромисса в пространстве противоречивых атрибутов надежности, времени и рисков при заданных ограничениях.

3. Функционально СППР СБОПР может быть реализована как программный блок анализа данных и принятия решений в формате трех базовых подсистем классификации состояний объекта исследования, прогноза динамики выходных индикаторов состояний и адаптации входных факторов к целевым состояниям, которые взаимодействуют друг с другом на основе взаимосвязанных задач анализа данных.

4. Блок анализа данных и принятия решений в общей функциональной структуре системы принятия решений на примере фрагмента системы безопасности угольной шахты, реализуется на базе классических парадигм нейросетевых моделей, методов их обучения с применением стандартных пакетов технического анализа. Это позволяет минимизировать время и средства за счет использования программ-эмуляторов нейросетевых моделей в обычных ПК.

### **Список литературы**

1. Хайкин С. / Нейронные сети: полный курс - [2-е изд.]; пер. с англ. / Хайкин С. - М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. - С. 1104.
2. Алёшин С.П., Бородин Е.А. Нейросетевое распознавание классов в режиме реального времени. Инженерный вестник Дона. - 2013. - №1 [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1494>.
3. Алёшин С.П. Ситуационные центры быстрого реагирования: принятие решений в среде нейроэмуляторов / С.П. Алёшин // Системы управления, навигации и связи - 2011. - № 1 (17). - С. 240 - 247.
4. Ляхов А. Л., Алёшин С.П., Бородин Е.А. Нейросетевая модификация текущего пространства признаков к целевому множеству классов. Вгсник Донбасько! державно! машинобудівної академл. - 2012. - № 4 (29) - С. 99 - 104.
5. Горбань А.Н., Россиев Д.А. Нейронные сети на персональном компьютере // Новосибирск: Наука, 1996.- 276 с.
6. Терехов В.А., Ефимов Д.В., Тюкин И.Ю. Нейросетевые системы управления: Учеб. пособие для вузов. - М.: Высш. школа 2002. - 183 с.
7. Алёшин С.П., Бородин Е.А. Нейросетевой базис ситуационного центра опережающего реагирования. Научные ведомости БелГУ - 2013.- №1 (144) - Выпуск 25/1 - С. 101-111
8. Ремезов А.В., Харитонов В.Г., Хлудов С.И. Основы горного дела. Снижение влияния газового фактора на повышение производительности очистного забоя и повышение безопасности ведения очистных работ на пластах с высокой газообильностью. //Учебное пособие. - Кемерово: Кузбассиздат, 2006 - 328 с.

## **THE INTELLIGENT DECISION SUPPORT TECHNOLOGY FOR THE SAFETY OF OBJECTS OF HIGH-RISK**

**S.P. ALESHIN**  
**A.L. LYANOV**  
**E.A. BORODINA**

*Poltava National Technical  
Yuri Kondratyuk University*

*e-mail:*

*aleshsp@ukr.net*

*LAL@pntu.edu.ua*

*lena\_borodina@ukr.net*

The work is devoted to the development of theoretical and applied foundations of automated intelligent decision-making systems for safety-critical infrastructures or facilities at risk. Proposed neural network analysis technology informative input features describing the threats of the decision rules of recognition of hazard classes based classifiers trained and adapt the set of input factors to the desired (acceptable) level of expected damage. Shows the functional diagram of basic functions of decision-making and the results of the responses of trained models for classification and prediction of experimental data.

Keywords: classifier, adaptation, forecast, neural network, training set, the matrix damage, risks, training the neural network.