

УДК 662.959.63

## **Экспресс-оценка риска на предприятиях машиностроения методами нейронных сетей<sup>1</sup>**

**В. В. Новиков**

(Кубанский государственный технологический университет),

**А. А. Мартыненко**

(Донской государственный технический университет),

**Н. В. Солонникова**

(Кубанский государственный технологический университет)

*Рассмотрены вопросы управления рисками в области безопасности труда на предприятиях машиностроения. Разработаны и представлены методика опроса экспертов по оценке риска для предприятий машиностроения и обучающая выборка. Работу нейросети следует отрегулировать таким образом, чтобы она соответствовала квалификации консилиума экспертов. Для данного консилиума характерны нормально распределённые разногласия в оценках отдельных экспертов внутри группы с  $3\sigma$ -интервалом до  $10\div 12$  баллов, или до  $100\div 120$  %. Построенные в нейромимитаторах нейромодели анализа риска на предприятиях машиностроения имеют сопоставимые с членом консилиума характеристики абсолютной и относительной погрешности. При этом регрессионный анализ обучающей выборки даёт существенно худшие по сравнению с нейромоделью результаты. Для построения графического материала были применены такие пакеты программ, как STATISTICA Neural Networks и NeuroSolutions.*

**Ключевые слова:** *риск, экспресс-оценка, динамический процесс, нейросеть.*

**Введение.** Управление рисками в сфере безопасности труда на предприятиях машиностроения — это динамический процесс принятия и реализации решений. Он должен обеспечивать минимизацию или снижение рисков гибели, травмирования, заболевания людей при выполнении ими своих должностных обязанностей [1].

**Основная часть.** Современные многоуровневые системы управления промышленной безопасностью на предприятиях машиностроения базируются на методологии анализа риска и методах искусственного интеллекта. Применяются следующие методы:

- статистики нечисловых данных и теории нечёткости;
- теории конфликтов;
- нейронных сетей;
- генетических алгоритмов и т. д. [2].

Возможности использования искусственных нейронных сетей для мониторинга безопасности предприятий машиностроения последнее время интенсивно изучаются. Проведён анализ специфики возникающих задач и распространённых методов их решения. Изучены различные архитектуры искусственных многослойных нейронных сетей. Представлены оценки их релевантности. В настоящее время ясна перспективность этого направления для дальнейшего прогресса в рассматриваемой области.

Применение нейросетевой технологии уместно в случаях, когда алгоритмический способ расчёта количественной меры опасности малоэффективен или известен не в полной мере. Достаточно лишь точно знать, что связь между входными и требуемыми выходными данными существует. Сама зависимость в данном случае выводится в процессе обучения (на наборе примеров) нейронной сети. При этом возможно построение нелинейной регрессионной зависимости или не-

---

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

линейной разделяющей поверхности, робастной к выбросам в данных. В данном случае не требуется априорно задавать вид нелинейной функции. Важна также возможность дообучать нейросеть по мере поступления новых опытных данных. В то же время нейронные сети обладают рядом серьёзных недостатков: не разработаны стандартные схемы построения архитектуры сети для конкретной задачи, а значения параметров элементов сети невозможно объяснить в терминах решаемой задачи. Нейронная сеть остаётся «чёрным ящиком».

Очевидным является то обстоятельство, что известный формальный алгоритм оценки риска часто уступает оптимальному решению эксперта, имеющего профессиональный опыт эксплуатации (в данном случае речь идёт об эксплуатации предприятий машиностроения). Особенности нейросетей позволяют учесть опыт оптимальных решений эксперта, часто принимаемых по трудноформализуемым алгоритмам, интуитивно или с использованием опытного знания.

Успех здесь во многом зависит от выбора признакового пространства, используемого для оценок. Важно, чтобы при оценке риска набор наиболее информативных для нейронной сети признаков совпадал с набором признаков, выделяемых или используемых человеком-экспертом. Если это условие соблюдено и сеть после обучения выдаёт балльную оценку риска с точностью, близкой к точности диагностики экспертов, то можно создавать компьютерные нейроэкспертные системы. Они аккумулируют опыт, знания экспертов и настраиваются с учётом специфики конкретной территории. Данные системы могут применяться при дефиците специалистов для быстрого принятия решений в опасной обстановке или для автоматизированного мониторинга безопасности.

Таким образом, показатель эффективности системы — точность решения этого же круга задач человеком-экспертом. Критерием может служить также уровень точности, по достижении которого применение нейромодели для автоматизации процесса принятия решения даёт экономический эффект. В примерах оценки риска на предприятиях машиностроения важно наличие разных ответов экспертов при одних и тех же исходных данных. Это принципиальный момент. Такая ситуация сближает задачу с регрессионным анализом.

В данной работе рассмотрены методологические задачи построения топологии, определения механизма обучения и процедуры тестирования нейронной сети — модели адекватного экспресс-анализа риска эксплуатации оборудования предприятий машиностроения.

При разработке топологии нейросети и выборе её синаптических коэффициентов должна быть использована обучающая выборка, построенная по опыту оптимальных решений экспертов, известных наблюдений и общепринятых рекомендаций и норм. Количественной мерой опасности является величина  $R$  предполагаемого риска, который определяется как произведение трёх составляющих:

$$R = L \cdot P \cdot Y,$$

где  $L$  — интенсивность проявления опасности;  $P$  — вероятности проявления опасности;  $Y$  — предполагаемый материальный ущерб [3].

Все составляющие оценивались экспертами в баллах для каждой опасности на конкретном рабочем месте (участке). Балльная оценка выставлялась экспертами по оценочным таблицам 1, 2 и 3. Типовой перечень опасностей приведён в табл. 4. Для каждого рабочего места данный перечень уточняется и оформляется в виде карты опасностей рабочего места (примерная форма карты приведена в табл. 5). По величине риска проводится ранжирование опасностей с установлением класса риска (табл. 6). Таблица 7 представляет собой форму для заполнения: одиннадцать экспертов-инженеров оценивают риски для предприятий машиностроения. Здесь данные раздела «Факторы» — это входные сигналы нейросети. Выходные сигналы — величины  $R, L, P, Y$ .

Рассмотрим исходное качество обучающей выборки и оценим уровень решения человеком задачи оценки риска эксплуатации газораспределительных систем.

Исходные данные, в пределах которых возможно применение нейромодели, получены в диапазоне, указанном в табл. 7. Причём проверка значимости показала, что основные показатели распределяются нормально (рис. 1, а, б).

Таблица 1

**Оценка интенсивности проявления опасности**

№ п/п	Интенсивность проявления опасности	L, балл
1	1 раз в смену	10
2	1 раз в сутки	9
3	1 раз в неделю	8
4	1 раз в месяц	7
5	1 раз в квартал	6
6	1 раз в полугодие	5
7	1 раз в год	4
8	1 раз в 3 года	3
9	1 раз в 5 лет	2
10	1 раз в 10 лет	1

Таблица 2

**Оценка вероятности проявления опасности**

№ п/п	Вероятность проявления опасности	P, балл
1	Очень высокая	10
2	Высокая	9
3	Возможна	8
4	Вероятна	7
5	Мало вероятна	6
6	Средняя	5
7	Ниже среднего	4
8	Низкая	3
9	Очень низкая	2
10	Ничтожная	1

Таблица 3

**Оценка предполагаемого материального ущерба**

№ п/п	Физический ущерб	Материальный ущерб, тыс. руб.	Y, балл
1	Авария с гибелью людей	Более 300	10
2	Групповой смертельный несчастный случай	210–300	9
3	Одиночный смертельный несчастный случай	170–210	8
4	Групповой несчастный случай с возможной инвалидностью	120–170	7
5	Авария с повреждением оборудования и строений	120–170	6
6	Тяжёлый несчастный случай с возможной инвалидностью	50–120	5
7	Авария с поломкой оборудования	10–50	4
8	Лёгкий несчастный случай, повлёкший потерю трудоспособности на срок от 1 недели до 1 месяца	3–10	3
9	Лёгкий несчастный случай, повлёкший потерю трудоспособности на 1 неделю	0,8–3	2
10	Лёгкий несчастный случай, повлёкший потерю трудоспособности на срок до 1 недели	0,8	1

Представим проведённый опрос экспертов как консилиум специалистов по определению балльной оценки *R* риска эксплуатации оборудования предприятий машиностроения. Среднюю балльную оценку можно понимать как итоговое мнение группы экспертов. На рис. 2, а показано, что отклонение от солидарного мнения группы имеет нормальное распределение с утроенным стандартным отклонением в 6 баллов, т. е. разногласия внутри группы могут достигать

10÷12 баллов. Это и есть абсолютная погрешность диагностики мастерами-экспертами. Относительная же погрешность в отклонениях от солидарного мнения группы, как видно из рис. 2, б, тоже имеет нормальное распределение с утроенным стандартным отклонением в 30 %, т. е. разногласия в оценках отдельных экспертов внутри группы могут достигать 100÷120 %.

Таблица 4

**Перечень типовых опасностей (фрагмент)**

Группа	Наименование опасности	Последствие (риск)	Оценка последствий
Опасности, связанные с оборудованием	Движущиеся (вращающиеся) части оборудования	Травма конечностей и тела	
	Незакреплённое оборудование (части, механизмы)	Травма глаз, травмы других частей тела	
	Незакреплённое оборудование на высоте	Травмы головы и других частей тела	
	Оголённые провода, неизолированные токоведущие части	Электрическая травма	
	Высокая температура поверхности	Ожоги	
	Низкая температура поверхности	Обморожение	
	Статическое электричество	Взрыв	
Опасности, связанные с транспортом	Движущийся автотранспорт	Наезд, травма	
	Работа автокрана	Падение груза, наезд, травмы, ущерб оборудованию	
	Автоцистерны с опасными веществами	Утечка, пожар, взрыв, травма, ущерб оборудованию	
Опасности, связанные с ёмкостями, трубопроводами	Горючие газы в трубопроводах	Разгерметизация, возгорание, взрыв	
		Травма, ущерб окружающей среде	
	Баллоны с газом	Разгерметизация, возгорание, взрыв	
		Травма, ущерб окружающей среде	
	Опасные жидкости в резервуарах и трубопроводах	Падение, утопление, ожог	
	Выбросы в атмосферу		

Таблица 5

**Карта опасностей рабочего места**

№ рабочего места	Наименование рабочего места	Группа опасностей	Наименование опасности	Последствие (риск)	Класс риска

Таблица 6

**Ранжирование опасностей (фрагмент)**

Группа	Наименование опасности	Последствие (риск)	Оценка в баллах				Ранг
			L	P	Y	R	
Опасности, связанные с оборудованием	Движущиеся (вращающиеся) части оборудования	Травма конечностей и тела					
	Незакреплённое оборудование (части, механизмы)	Травма глаз, травмы других частей тела					
	Незакреплённое оборудование на высоте	Травмы головы и других частей тела					
	Оголённые провода, неизолированные токоведущие части	Электрическая травма					
	Высокая температура поверхности	Ожоги					
	Низкая температура поверхности	Обморожение					
	Статическое электричество	Взрыв					
Опасности, связанные с транспортом	Движущийся автотранспорт	Наезд, травма					
	Работа автокрана	Падение груза, наезд, травмы, ущерб оборудованию					

Автоцистерны с опасными веществами	Утечка, пожар, взрыв, травма, ущерб оборудованию						
------------------------------------	--	--	--	--	--	--	--

Таблица 7

**Оценка риска предприятия машиностроения одиннадцатью экспертами — инженерами ПТО (форма для заполнения)**

Оборудование	Рабочее место	Факторы								Оценка в баллах			
										L	P	Y	R

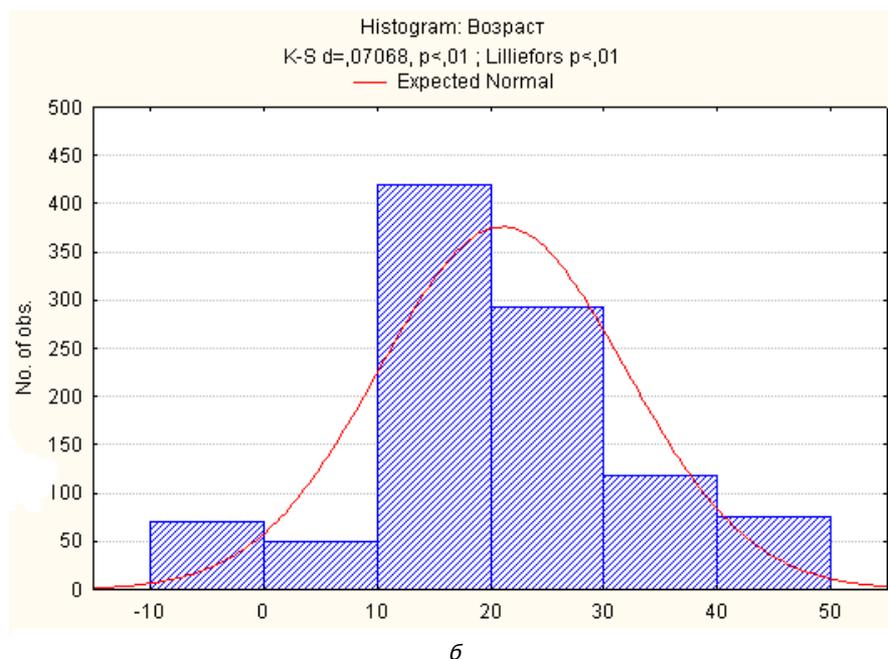
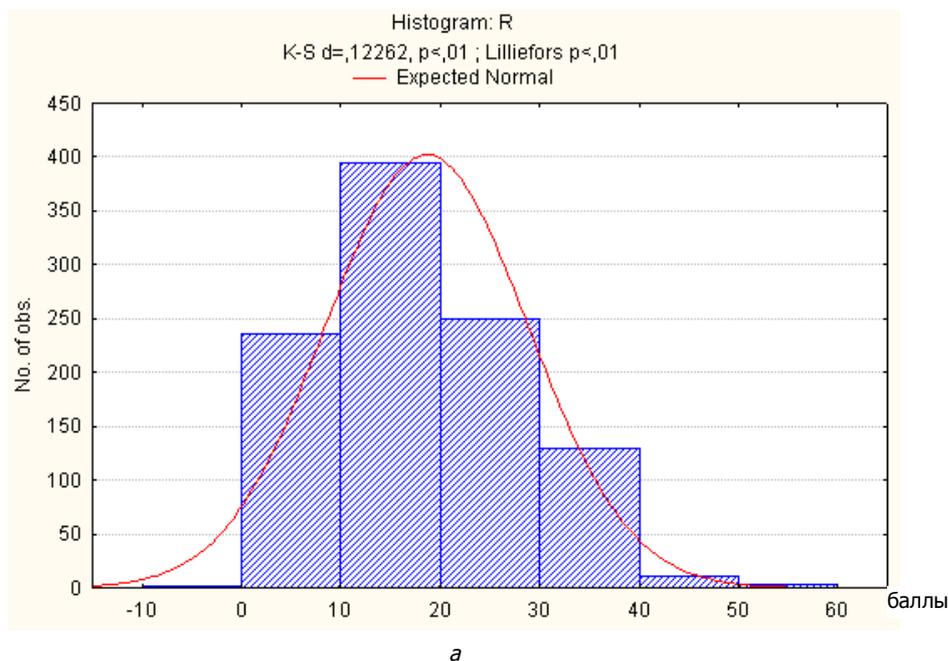


Рис. 1. Проверка гипотезы о нормальности показателей (признаков): балльная оценка риска (а); срок эксплуатации (б)

Напомним, что в примерах экспертной оценки риска на предприятиях машиностроения при одних и тех же исходных данных принципиально наличие разных ответов. Такая ситуация сближает задачу с регрессионным анализом.

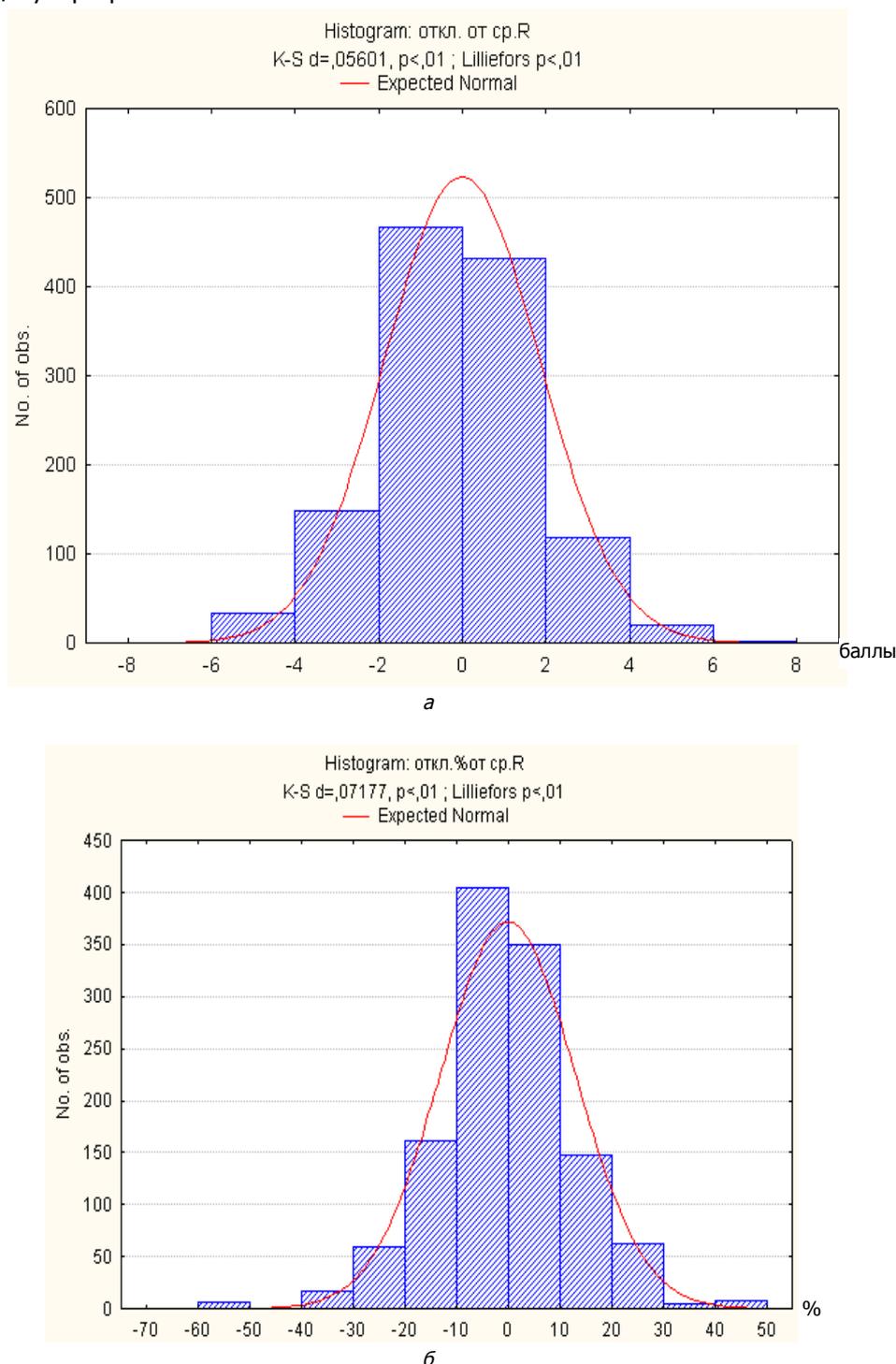


Рис. 2. Разброс мнений в обучающей группе экспертов по  $R$ , т. е. отклонения от средней оценки  $R$  в баллах (а) и в % (б)

Поэтому моделирование следует начинать с простейших классических моделей (регрессия, линейный дискриминантный анализ и др. [4]) и только после этого переходить к нейронным сетям. Классические модели задают уровень точности, ниже которого не должна опускаться бо-

лее гибкая нейромодель. Они покажут реальную пользу от использования более сложных методов по сравнению с более простыми при решении конкретной задачи.

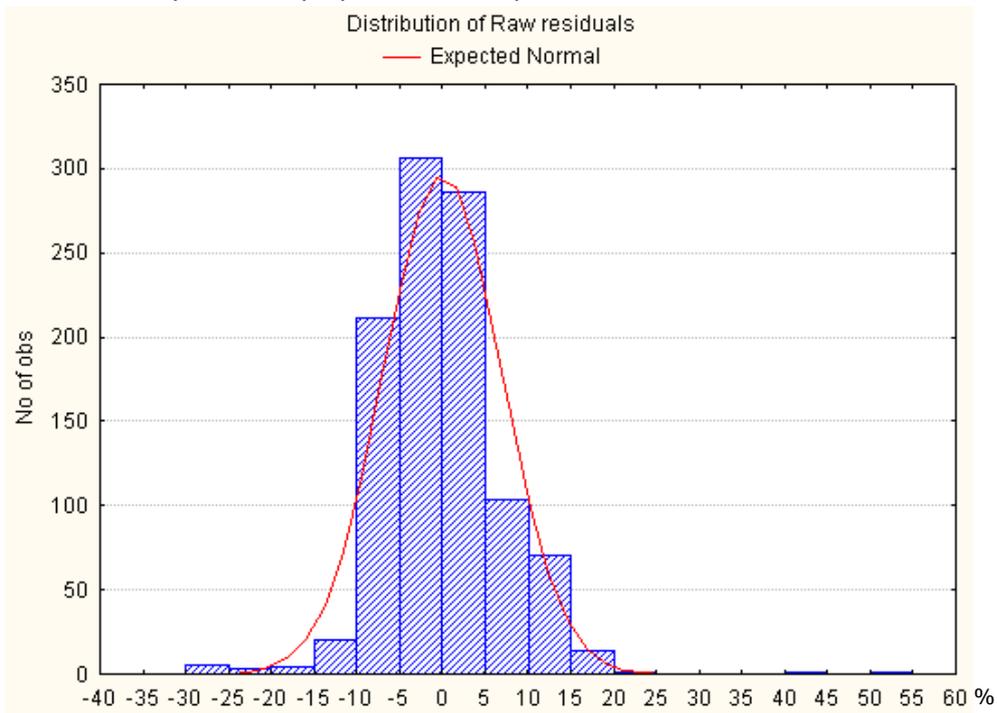


Рис. 3. Распределение остатков множественной регрессии

Расчёты проведены в пакете *Statistica v.6.0* (*StatSoft Inc., USA*) [4]. Линейная множественная регрессия даёт коэффициент корреляции 0,73 и практически нулевой уровень значимости по критерию Фишера.

Из рис. 3 видно, что отклонение такого «регрессионного эксперта» от мнений других членов группы экспертов имеет нормальное распределение с утроенным стандартным отклонением в 15 баллов, т. е. его квалификация в полтора раза хуже остальных (если сравнивать по ширине 3  $\sigma$ -интервала).

Заметим, что процесс и результаты регрессионного анализа обучающей выборки можно трактовать как «обучение» ещё одного эксперта-человека, выполнявшего данный анализ. Рассмотрим, как с подобным анализом справилась нейросеть.

Чтобы обеспечить решение задачи нейросетью, требуется выполнение нескольких шагов нейромоделирования, зачастую различающихся методами и целями. Это снижает опасность неадекватности построенной модели в следующих случаях:

- обучающая выборка неrepresentative;
- структура модели избыточна и позволяет при обучении запомнить шумовую компоненту в данных;
- неправильно выбраны целевые функции обучения;
- не оптимально выбраны настройки алгоритма обучения, и т. д.

В пакете *STATISTICA Neural Networks* у наилучшей найденной нейросети (рис. 4) величина регрессионного отношения — 0,6 и корреляция — 0,8. Для обученной нейросети уровень правильных ответов примерно одинаков и по точности обобщения, и по распознаванию на обучающей выборке.

Отклонение такого «нейроэксперта» от мнений других членов группы экспертов имеет нормальное распределение с утроенным стандартным отклонением в 10 баллов, а по относитель-

ной погрешности —  $100 \div 140$  %. Можно говорить (и по абсолютной, и по относительной погрешности, если сравнивать по ширине  $3\sigma$ -интервала) о сопоставимости квалификации «мнения нейроэксперта» с диагностикой членов группы мастеров-экспертов (см. рис. 2).

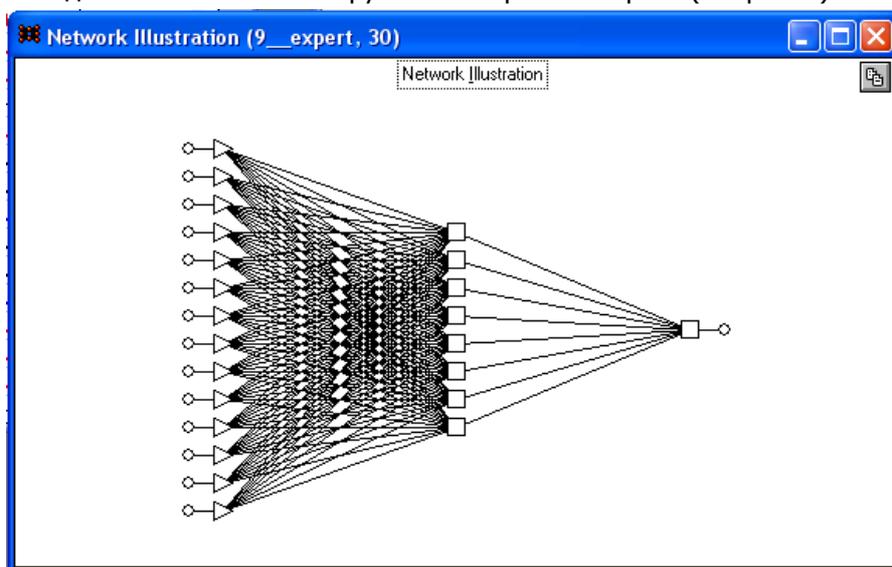


Рис. 4. Топология нейросети

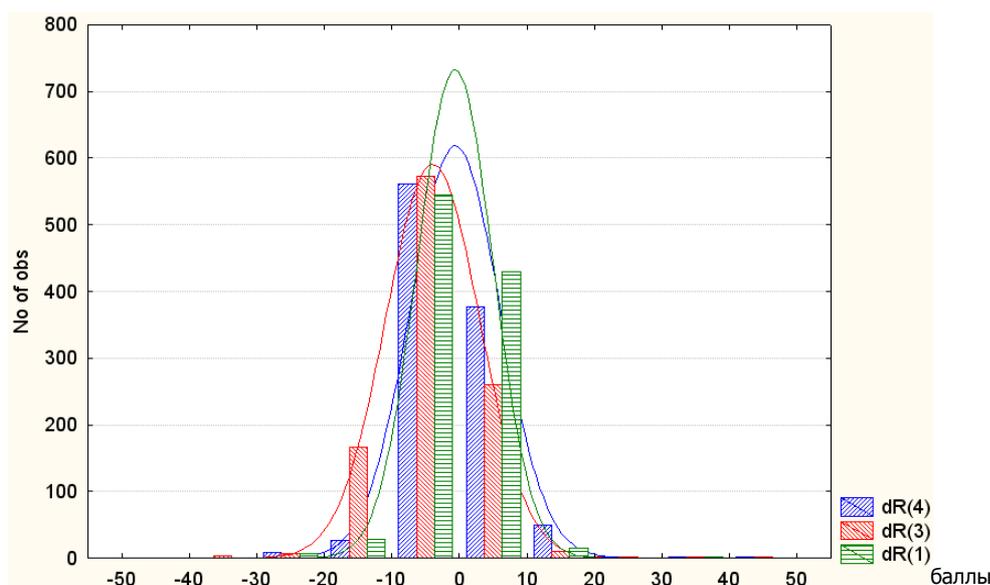


Рис. 5. Распределение расхождений оценки  $R$  (в баллах) нейросети и группы экспертов при четырёх выходах  $R, L, P, Y(4)$ ; трёх выходах  $L, P, Y$  и  $R = L \cdot P \cdot Y(3)$ ; одном выходе  $R(1)$  (пакет *NeuroSolutions*)

Сравнение с результатами регрессионного анализа (см. рис. 3) говорит в пользу нейромодели: ошибки в  $15 \div 20$  баллов исключены, а в  $10 \div 15$  баллов снижены более чем в 2 раза.

В пакете *NeuroSolutions* обученная нейросеть дала чуть лучшие результаты (см. рис. 5). Как видно из рис. 5, наилучшим был вариант, когда нейросеть обучалась только при одном выходе —  $R$ . При добавлении выходов  $L, P, Y$  результаты обучения снижались.

#### Выводы.

1. Разработана методика опроса экспертов по оценке риска для предприятий машиностроения и построена обучающая выборка.

2. Консилиум группы экспертов, к квалификации которого требуется приблизить нейросеть, имеет нормально распределённые разногласия в оценках отдельных экспертов внутри группы (с  $3\sigma$ -интервалом до  $10 \div 12$  баллов, или до  $100 \div 120$  %).

3. Построенные в нейромимитаторах нейромодели анализа риска на предприятиях машиностроения имеют сопоставимые с членом консилиума характеристики абсолютной и относительной погрешности. А регрессионный анализ обучающей выборки даёт существенно худшие по сравнению с нейромоделью результаты.

**Библиографический список**

1. Акимов, В. А. Основы анализа и управления риском в природной и техногенной сферах : учебное пособие для вузов / В. А. Акимов, В. В. Лесных, Н. Н. Радаев. — Москва : Деловой экспресс, 2004. — 226 с.

2. Белов, П. Г. Системный анализ и моделирование опасных процессов в техносфере : учебное пособие для студентов вузов / П. Г. Белов. — Москва : Академия, 2003. — 132 с.

3. Вишняков, Я. Д. Общая теория рисков : учебное пособие для вузов / Я. Д. Вишняков, Н. Н. Радаев. — Москва : Академия, 2007. — 202 с.

4. Методы анализа и оценки риска опасных промышленных объектов / А. Ф. Егоров [и др.] // Безопасность жизнедеятельности. — 2007. — № 7. — 27–32.

Материал поступил в редакцию 07.02.13.

**References**

1. Akimov, V. A., Lesnykh, V. V., Radayev, N. N. *Osnovy` analiza i upravleniya riskom v prirodnoj i tehnogennoj sferax : uchebnoe posobie dlya vuzov.* [Risk analysis and management basics in natural and technogenic spheres : textbook for universities.] Moscow : Delovoj e`kspress, 2004, 226 p. (in Russian).

2. Belov, P. G. *Sistemny`j analiz i modelirovanie opasny`x processov v texnosfere : uchebnoe posobie dlya studentov vuzov.* [System analysis and simulation of hazardous processes in technosphere : textbook for university students.] Moscow : Akademiya, 2003, 132 p. (in Russian).

3. Vishnyakov, Y. D. *Obshhaya teoriya riskov : uchebnoe posobie dlya vuzov.* [Risk general theory : textbook for universities.] Moscow : Akademiya, 2007, 202 p. (in Russian).

4. Yegorov, A. F., et al. *Metody` analiza i ochenki riska opasny`x promy`shlen-ny`x ob`ektov.* [Analysis technique and risk assessments of hazardous operations industrial facilities.] *Bezopasnost` zhizhnedeyatel`nosti*, 2007, no. 7, pp. 27–32 (in Russian).

**RISK RAPID ASSESSMENT AT ENGINEERING ENTERPRISES THROUGH NEURAL NETWORKS<sup>1</sup>**

**V. V. Novikov**

(Kuban State Technical University)

**A. A. Martynenko**

(Don State Technical University)

**N. V. Solonnikova**

(Kuban State Technical University)

*Some issues on the risk management regarding the operation safety at the engineering enterprises are considered. The expert survey technique on the risk assessment for the mechanical engineering enterprises, and the training set are developed. The neuronet operation should be adjusted to satisfy the expert council qualification. Normally distributed differences in the individual assessments within the expert group with 3σ-interval up to 10÷12 points, or up to 100÷120 % are characteristic of the given council. The developed in the neurosimulators neuromodels for the risk analysis at the mechanical engineering enterprises have the associated with the council member's absolute and relative error specifications. At that, the regression analysis of the training set yields essentially worse results as opposed to the neuromodel. For the construction of graphics, such software packages as STATISTICA Neural Networks and NeuroSolutions were used.*

**Keywords:** risk, rapid assessment, dynamic process, neural network.

---

<sup>1</sup> The research is done within the frame of the independent R&D.