

Н.Н. Елин¹, В.Б. Бубнов¹, В.А. Мыльников², Т.Н. Елина²

(¹Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,

²Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения;
e-mail: yelinnn@mail.ru)

ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ПЕРСПЕКТИВНОМУ РАЗВИТИЮ СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДСКОГО РАЙОНА НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ОБРАТНОГО НЕЧЁТКОГО ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА

Разработана экспертная система принятия решений по перспективному развитию системы водоснабжения городского района с использованием модели обратного нечёткого логического вывода. Её применение позволит повысить эффективность и надёжность системы водоснабжения за счёт более адекватного учёта постоянно изменяющихся прогнозов по динамике водопотребления, учёта большего количества факторов и взаимосвязей между ними.

Ключевые слова: экспертная система, нейронные сети, нечёткая логика, система водоснабжения, системы поддержки принятия решений, информационная система, моделирование.

Система водоснабжения является важнейшей частью системы жизнеобеспечения городского района, обеспечивающей комфорт и безопасность его жителей.

Так как развитие систем водоснабжения определяется многими факторами, некоторые из которых трудно поддаются прогнозированию, то существующая практика проектирования и строительства крупными очередями часто приводит к тому, что многие трубопроводы, насосные станции и другие сооружения работают в режимах, весьма далёких от оптимальных. Наиболее перспективным методом повышения эффективности технических решений и управления ими с целью достижения наилучших технико-экономических показателей и повышения надёжности является переход к практике непрерывного развития и реконструкции этих систем с учётом накапливаемой информации, а также с учётом ограничений на величину материальных и финансовых ресурсов. Переход к такой практике обеспечивается внедрением в практику **систем поддержки принятия решений (СППР)**. Основные проблемы при построении СППР заключаются в многофакторности и низкой достоверности исходной информации.

Разработка многофакторной и слабо формализуемой СППР по перспективному развитию системы водоснабжения городского района осложняется низкой достоверностью исходной информации количественного и качественного характера. Используемые при построении СППР факторы предлагается разделить на группы:

1. Объём потребления воды.
 2. Фактическое состояние инженерного оборудования.
 3. Химический состав воды.
 4. Климатические условия района.
 5. Экологические показатели.
- и другие.

Разрабатываемая СППР должна обладать свойствами открытости, самоадаптируемости и удовлетворять принципам гибкого масштабирования. В этом случае наиболее эффективным является применение нейро-нечётких методов моделирования [1], основанных на знаниях экспертов и позволяющих обучать систему на ретроспективной информации [2]. Преимущества нечётких нейронных сетей перед обычными нейронными сетями заключаются в возможности более эффективной работы при низкой достоверности исходной статистической информации, а также возможности работы с качественными показателями моделируемого объекта.

Главным достоинством такого подхода является возможность контроля исполнения разработанных планов развития системы путём применения механизма обратного логического вывода [3], обеспечивающего оптимальный выбор направления работ и распределения ресурсов на основе принятой стратегии развития.

Целью моделирования является определение набора критериев, наиболее сильно влияющих на текущее или желаемое состояние системы.

Статистический анализ ретроспективной информации позволяет обосновать набор значимых критериев, формирующих целевую функцию и сформировать в качестве рабочей редуцированную базу знаний. Данная задача относится к области многомерного анализа больших данных [4] и включает этапы подготовки (отбора) критериев, формирование их весов (относительной важности) и шкал для обеспечения сравнимости различных по характеру и качественной принадлежности показателей, операции по введению новых критериев и удалению незначимых, которая необходима вследствие постоянного развития изучаемой системы, а также этапа свёртки критериев [5].

Пусть $K = \{k_1, k_2 \dots k_n\}$ – множество критериев (предпосылок), ведущих к текущему или требуемому состоянию системы $Y = \{y_1, y_2 \dots y_n\}$. Очевидно, что K и Y связаны причинно-следственными отношениями, где K – причина, Y – следствие. Задача нейро-нечёткого моделирования состоит в первоначальном формировании матрицы причинно-следственных связей, её постоянной корректировки с учётом фактических данных, а также поиска вектора причин K , вызвавших текущее состояние вектора следствий Y .

Разрабатываемая система является экспертной (**ЭСПП – экспертная система поддержки принятия решений**) продукционного типа, где все множество знаний хранится в виде древовидной структуры (рис. 1).

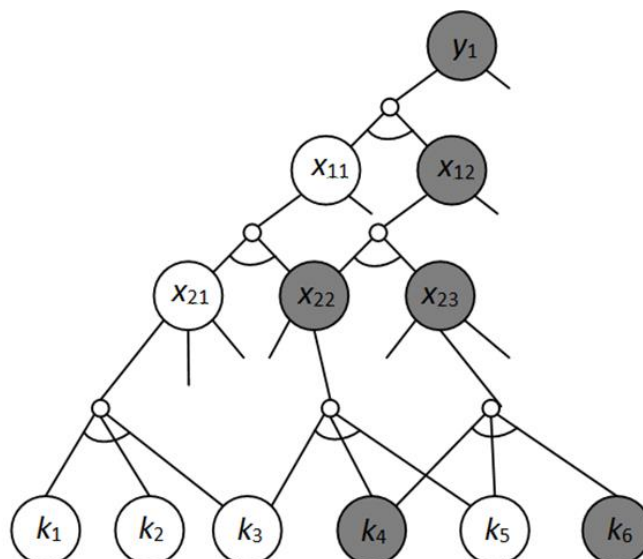


Рис. 1. Фрагмент структуры графа продукционной ЭСПП по перспективному развитию системы водоснабжения городского района

С помощью графа (рис. 1) обратный вывод в ЭСПП продукционного типа можно представить как задачу поиска определённого пути на графе. Так как в данной системе присутствует несколько сотен правил, для повышения эффективности поиска и минимизации времени решения задачи могут использоваться стратегии поиска в глубину и в ширину [6]. Алгоритм поиска в глубину более эффективен в отношении времени поиска и обработки знаний, однако он характеризуется более высоким риском потери перспективных решений по сравнению с поиском в ширину.

Степень истинности (вес) компонент вектора Y представим нечётким множеством $V^y = \{v_1|y_1, v_2|y_2, \dots, v_m|y_m\}$, где $v_m \in [0..1]$ – степень истинности i -й компоненты. Причинно-следственную связь между K и Y зададим в виде бинарного нечёткого отношения $P = \{\mu(k_i, y_j) | k_i, y_j\}$, где $i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m$. Отношение P можно представить в виде матрицы (1), элементы которой априорно определяются экспертами, поскольку на этапе первоначального формирования системы нет возможности получить достаточное количество статистических данных. В будущем элементы матрицы P будут скорректированы в процессе обучения нейро-нечёткой сети на фактических данных.

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ p_{m1} & p_{m2} & \dots & p_{mn} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Задача поиска предпосылок K состояния Y состоит в определении возможных значений степеней принадлежности вектора K . Для этого необходимо найти такое нечёткое множество $W^k = \{\mu(k_1)|k_1, \mu(k_2)|k_2, \dots, \mu(k_n)|k_n\}$, которое соответствовало бы нечёткому множеству V^y . При этом связь между причиной и следствием определяется нечётким продукционным правилом $W^k \rightarrow V^y$.

Предварительный анализ показывает, что для практически важных случаев $K \leq 10$, а $1 \leq Y \leq 5$. Следовательно максимальная размерность матрицы $P - 10 \times 5$.

Концептуальная модель архитектуры адаптивной нейро-нечёткой сети представлена на рис. 2.

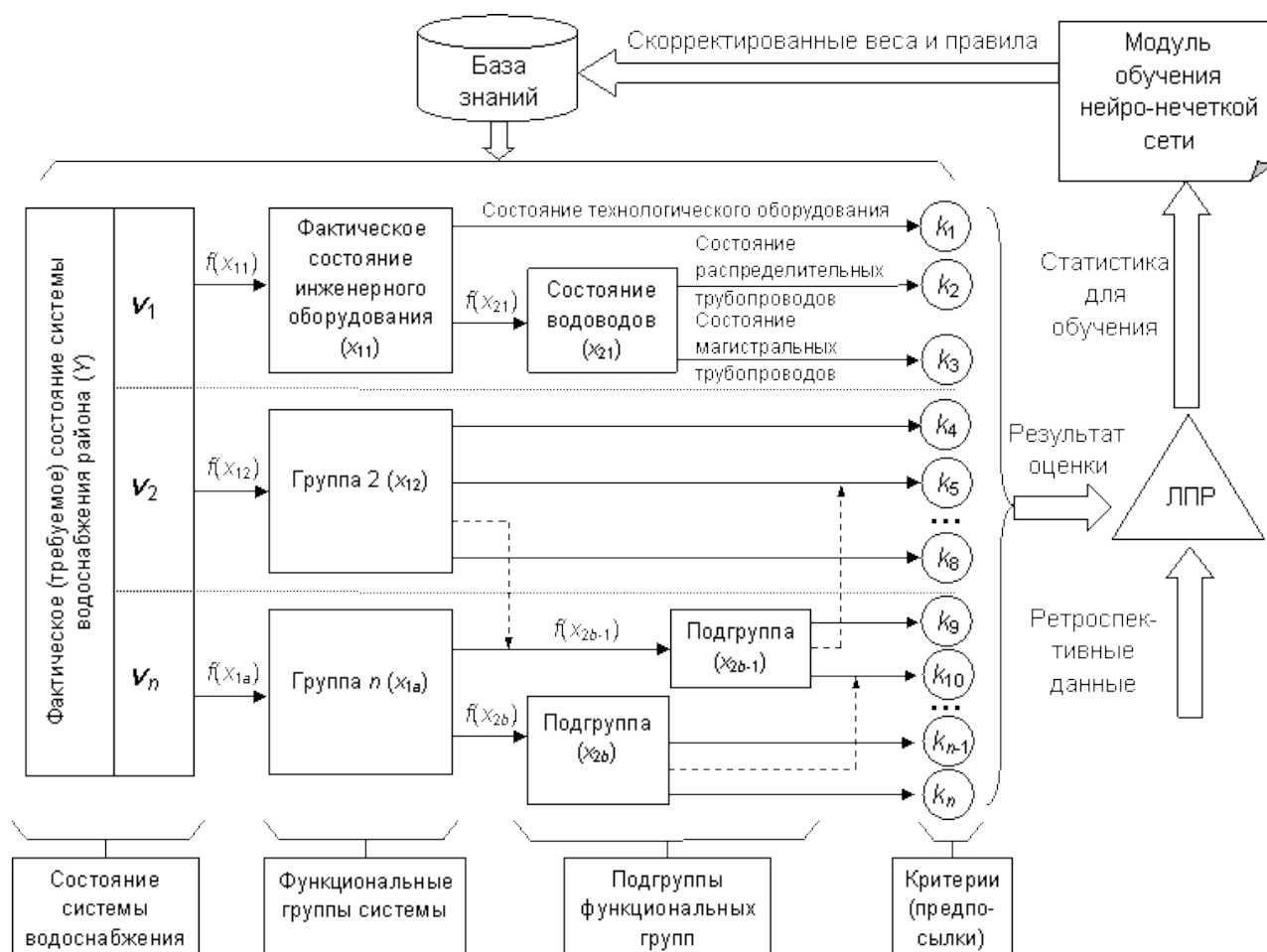


Рис. 2. Нейро-нечёткая модель системы поддержки принятия решений с обратным нечётким логическим выводом

Каждый из выделенных слоёв соответствует определённому уровню состава критериев (рис. 1). Первый слой представляет собой комплексную экспертную оценку состояния системы водоснабжения района. Результирующий набор критериев представляет собой совокупность количественных и качественных показателей оценки объектов, определяющих предпосылки (причины) текущего (желаемого) состояния системы, группирование которых осуществляется нечётко. Второй и третий слои системы отражают качественные характеристики основных направлений функциональных групп и подгрупп, получаемые посредством нечёткой агрегации критериев. Каждая группа/подгруппа представляет собой совокупность укрупнённых критериев оценки и с учётом заданного вектора развития.

Лицо, принимающее решение (ЛПР) является одновременно потребителем результатов работы системы и управляющим элементом, задавая требуемые параметры системы. Кроме того, ЛПР добавляет в систему фактические ретроспективные данные с целью дальнейшего обучения сети, корректировки весов критериев и нечётких правил.

На основе экспертных оценок построена система обратного нечёткого логического вывода типа Мамдани. Эксперты должны отвечать на вопросы анкеты. Оценка согласованности ответов производится по методу Т. Саати [7]. Используется информация от 5-15 экспертов с предварительной взаимной оценкой и отсеиванием низкорейтинговых. Функции принадлежности термов входных переменных Y – сигмоидного и гауссовского типов, промежуточных переменных X – треугольного типа, выходных переменных K – гауссовского типа. Выбор гауссовского типа функций принадлежности объясняется их универсальностью и возможностью трансформирования в другие функции. В структуре нейро-нечёткой сети выделены четыре слоя: термы входных переменных, антецеденты нечётких правил, нормализация степеней выполнения правил, заключения правил, агрегирование результата.

Для обучения сети использовался модифицированный алгоритм [8], адаптированный для систем нечёткого вывода типа Мамдами [9]. Параметры сети, отобранные для настройки в процессе обучения, следующие: коэффициенты концентраций функций принадлежности входных и выходных переменных (L_i); координаты максимума функций принадлежности входных и выходной переменных (H_i); веса правил всех нечётких систем (V).

Обучение сети сводится к решению следующей задачи: найти такой вектор (L_i, H_i, V), чтобы значение ошибки было минимальным:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M} \cdot \sum_{i=1,n} (K_r - F(L_i, H_i, V, Y_r))^2} \rightarrow \min,$$

где Y_r – входной вектор в r -й паре обучающей выборки;

K_r – соответствующий выход;

$F(L_i, H_i, V, Y_r)$ – результат вывода по иерархической системе.

Алгоритм обучения представлен на рис. 3.

Предложенная модель СППР перспективного развития системы водоснабжения городского района обеспечит оперативный анализ исходных данных, определение причинно-следственных связей между характеристиками отдельных элементов и комплексным состоянием всей системы, а также выбор адекватных методов контроля и планирования. Применяемые технологии позволяют сформировать результаты, имеющие максимально объективный и непротиворечивый характер.

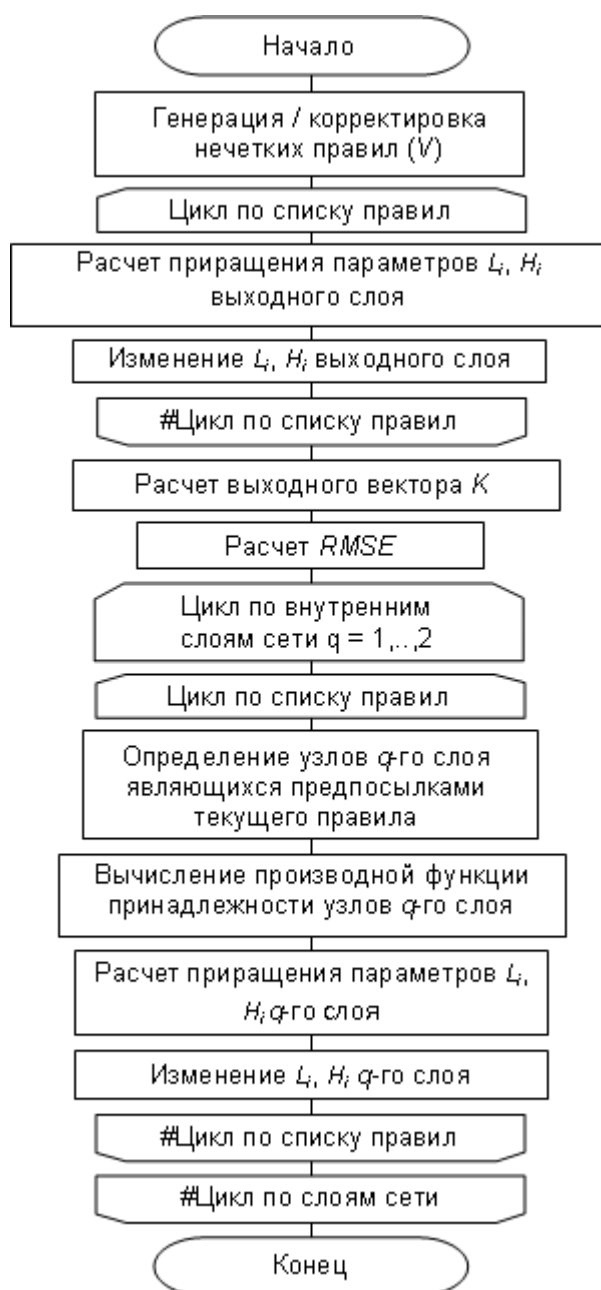


Рис. 3. Алгоритм обучения нейро-нечёткой сети

Для реализации предложенных моделей разработана архитектура информационной системы (рис. 4), реализующей процессы поддержки принятия решений в области управления развитием системы водоснабжения городского района, использующая OLAP-технология хранения данных [10], поскольку важным отличием OLAP от OLTP-систем является то, что данные в них сохраняют свою истинность в любой момент процесса чтения. Под витриной данных понимается специализированное хранилище, обслуживающее одно из направлений анализируемой деятельности, так как происходящие в нём бизнес-процессы, во-первых, относительно изучены и, во-вторых, не столь сложны, как процессы в масштабах всей системы.

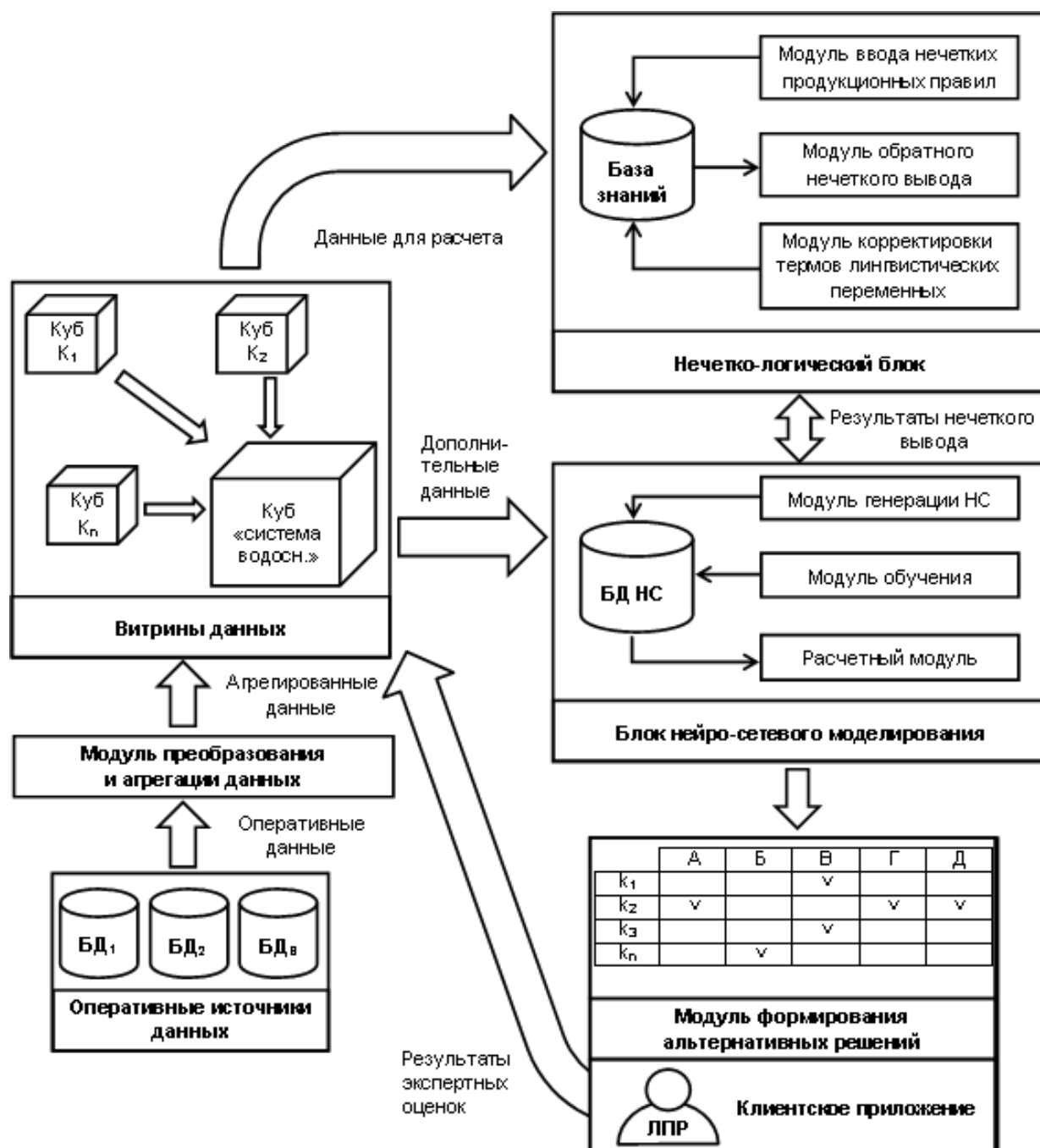


Рис. 4. Архитектура информационной системы для поддержки принятия решений по перспективному развитию системы водоснабжения городского района

Многомерный анализ данных, основанный на OLAP-технологии, позволит проводить мягкий мониторинг системы водоснабжения по выделенным в процессе проектирования фактам. А бизнес-правила, реализованные в виде расширенных хранимых процедур на уровне сервера, позволят в случае необходимости добавлять новые измерения куба или их уточнять, вычислять новые меры (в том числе и качественные) и строить новые факты.

Применение на практике разработанной методики построения СППР и её компьютерной реализации в виде ИС позволит повысить эффективность и надёжность постоянно развивающейся системы водоснабжения городского района за счёт:

1. Более адекватного учёта постоянно изменяющихся прогнозов по динамике водопотребления.
2. Учёта большего количества факторов.
3. Учёта взаимосвязей между различными факторами, влияющими на целевые показатели системы водоснабжения.

Литература

1. Бельский В.М., Прус Ю.В., Спиридонов В.Г. Алгоритмы формирования базы данных и построения математической модели профессионального риска на основе нейроподобных сетей // Технологии техносферной безопасности. Вып. 3 (61). 2015. С. 338-343. <http://academygps.ru/ttb>.
2. Гвоздик М.И., Подружская Т.А. Состояние и перспективы разработки информационных систем поддержки принятия решений в условиях чрезвычайных ситуаций // Технологии техносферной безопасности. Вып. 6 (58). 2014. С. 272-276. <http://academygps.ru/ttb>.
3. Ахрем А.А., Ашинянц М.Р., Петров С.А. Нечёткий логический вывод в системе принятия решений // Труды ИСА РАН. 2007. Т. 29. С. 265-275.
4. Каширин И.Ю., Семченков С.Ю. Интерактивная аналитическая обработка данных в современных OLAP-системах // Анализ данных и интеллектуальные системы. 2009. № 2. С. 12-19.
5. Мизонов В.Е., Елин Н.Н., Елина Т.Н., Мыльников В.А. Техно-экономическое обоснование выбора варианта эксплуатации теплоизолированных водоводов при надземной прокладке в условиях крайнего севера // Промышленная энергетика. 2014. № 5. С. 38-42.
6. Edelkamp Stefan, Schrödl Stefan. Heuristic search: theory and applications // Morgan Kaufmann Publishers. 2012. 712 с. ISBN 978-0-12-372512-7.
7. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.
8. Фомичева С.Г., Елина Т.Н. Нейро-нечёткое моделирование стратегического взаимодействия участников рынка труда моноиндустриального региона // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2010. Т. 3. № 101. С. 174-181.
9. Штовба С.Д. Проектирование нечётких систем средствами MATLAB. М.: Горячая линия – Телеком, 2007. 288 с.
10. Елин Н.Н., Фомичева С.Г., Елина Т.Н., Мыльников В.А. Моделирование процессов управления проектами на основе мультиагентных информационных технологий // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2016. № 5 (365). С. 220-224.

Статья поступила в редакцию интернет-журнала 11 сентября 2017 г.

N.N. Yelin, V.B. Bubnov, V.A. Mylnikov, T.N. Elina

EXPERT SYSTEM OF DECISION-MAKING ON PERSPECTIVE DEVELOPMENT OF SYSTEM OF WATER SUPPLY OF THE URBAN AREA ON THE BASIS OF MODEL OF THE RETURN INDISTINCT LOGICAL CONCLUSION

It is shown that the most promising method for increasing the effectiveness of technical solutions and managing the water supply system in the city district in order to achieve the best technical and economic indicators and increase its reliability is the transition to the practice of continuous development and reconstruction of these systems, taking into account the accumulated information, and also taking into account restrictions on the amount of material and financial resources.

To implement this method, an expert decision-making system has been developed using the inverse fuzzy inference model, the advantages of which are the ability to work more efficiently with low reliability of the initial statistical information, as well as the ability to work with the quality indicators of the modeled object. At the same time, neural-fuzzy modeling methods are used, based on expert knowledge and allowing the system to be taught on retrospective information. In the structure of the neural-fuzzy network, four layers are distinguished: the terms of the input variables, the antecedents of fuzzy rules, the normalization of the degree of implementation of the rules, the conclusion of rules, aggregation of the result. To train the network, a modified algorithm is used, adapted for Mamdani type fuzzy inference systems. To implement the proposed models, the architecture of the information system has been developed.

Application of the expert system will improve the efficiency and reliability of the water supply system by more adequately consideration of the constantly changing forecasts on the dynamics of water consumption, by taking into account more factors and the interrelations between them.

Key words: expert system, neural networks, fuzzy logic, system of water supply, decision support system, information system, modeling.

References

1. Belenkiy V.M., Prus Yu.V., Spiridonov V.G. The algorithms of database generation and building professional risk mathematical models founded on neural networks. *Tekhnologii tekhnosfernoi bezopasnosti*, vol. 3 (61), 2015, pp. 338-343. <http://academygps.ru/ttb> (in Russ.).
2. Gvozdk M.I., Podrzhkina T.A. Station and prospects of development of information systems of support of making decisions for management in emergency situations. *Tekhnologii tekhnosfernoi bezopasnosti*, vol. 6 (58), 2014, pp. 272-276. <http://academygps.ru/ttb> (in Russ.).
3. Akhrem A.A., Ashinians M.R., Petrov S.A. *Nechetkii logicheskii vyvod v sisteme priniatiia reshenii* [Fuzzy inference in the decision-making system]. *Trudy ISA RAN*, 2007, vol. 29, pp. 265-275.
4. Kashirin I.I., Semchenkov S.I. Interaktivnaia analiticheskai obrabotka dannykh v sovremennykh OLAP-sistemakh [Interactive analytical data processing in modern OLAP-systems]. *Analiz dannykh i intellektualnye sistemy*, 2009, no. 2, pp. 12-19.
5. Mizonov V.E., Elin N.N., Elina T.N., Mylnikov V.A. Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie vybora varianta ekspluatatsii teploizolirovannykh vodovodov pri nadzemnoi prokladke v usloviakh krainego severa [Technical and economic justification of the choice of the option of operation of the heat-insulated water pipelines at the elevated laying in the conditions of the far North]. *Promyshlennai energetika*, 2014, no. 5, pp. 38-42.
6. Edelkamp Stefan, Schrödl Stefan. Heuristic search: theory and applications. Morgan Kaufmann Publishers. 2012, 712 p, ISBN 978-0-12-372512-7.
7. Saati T. *Priniatie reshenii. Metod analiza ierarkhii* [Decision making. Method of hierarchy analysis.]. Moscow, Radio i sviaz Publ., 1993, 278 p.
8. Fomicheva S.G., Elina T.N. *Neiro-nechetkoe modelirovanie strategicheskogo vzaimodeistviia uchastnikov rynka truda monoindustrialnogo regiona* [Neuro-fuzzy modeling of strategic interaction of labor market participants in the monoindustrial region]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie*, 2010, vol. 3, no. 101, pp. 174-181.
9. Shtovba S.D. *Proektirovanie nechetkikh sistem sredstvami MATLAB* [Design of fuzzy systems by means of MATLAB]. Moscow, Goriachaia liniia – Telekom Publ., 2007, 288 p.
10. Elin N.N., Fomicheva S.G., Elina T.N., Mylnikov V.A. Modeling of Project Management Processes Based on Multi-Agent Information Technology. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiiia tekstilnoi promyshlennosti*, 2016, no. 5 (365), pp. 220-22 (in Russ.).