

УДК 004: 681.5

doi: 10.26102/2310-6018/2019.24.1.018

В.П. Поваров
**ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
СИСТЕМЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ
ОБЪЕКТАМИ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

Филиал ОАО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция», Нововоронеж, Россия

Работа посвящена вопросам разработки программного комплекса интеллектуальной системы принятия решений в задачах управления процессами функционирования объектами ядерной энергетики. Показано, что построение программного комплекса требует выбора структуры на основе анализа поставленных перед программным обеспечением задач. С учётом разработанного математического обеспечения, реализованного в виде комплекса математических моделей, позволяющих производить анализ данных путём обработки входной информации, и алгоритмов, выполняющих формирование структуры системы, её оптимизацию и обеспечивающих её работу, были определены и реализованы следующие основные функции: формирование регрессионной модели в зависимости от входного информационного потока информативных данных; формирование нейросетевой структуры в зависимости от входного информационного потока данных; настройка параметров системы с целью обеспечения требуемого качества её функционирования; визуальное отображение информации о качестве функционирования программного обеспечения; обеспечения хранения данных в доступной и удобной для понимания форме; обеспечение хранения настраиваемых параметров системы и их динамики в процессе обучения ANFIS-подобной нейросетевой модели. Предложенные инженерные решения позволили повысить качество принятия решений за счет оперативности и достоверности обрабатываемой информации, а также за счет снижения общей ошибки прогноза.

Ключевые слова: система принятия решений, многопараметрический мониторинг, прогнозирование, база данных, база знаний, нечеткая нейронная сеть

Введение

История атомной энергетики, не смотря на высочайшие требования безопасности производства, знает немало катастроф. После каждого происшествия вводятся новые правила и нормы безопасности, обязательные для всех объектов атомной энергетики в мире. Современные математические методы позволяют производить точное моделирование самых сложных процессов, анализировать возможные критические ситуации в процессах и пути и меры их предотвращения. Эти меры значимы на протяжении всего жизненного цикла производственного объекта, но особенно - на стадии его проектирования. Обычно уровень опасности объекта, функционирующего в штатном, предусмотренном проектом

режиме, несравненно ниже уровня опасности, который представляет объект в условиях аварийной ситуации.

Если проанализировать различные аварии на особо опасных объектах, можно выделить ряд общих причин: ошибки в проектах, неправильные решения о месте постройки объекта и режимах их эксплуатации, недооценка подготовки персонала, халатность и беспечность. Но анализ случившихся аварий не решает всех проблем. Необходимо не только находить «слабые звенья» в технологических цепочках, но и прогнозировать, как будут развиваться события, вызванные аварией на опасных производственных объектах, формировать решения, необходимые для минимизации риска.

Для минимизации рисков на Нововоронежской АЭС была разработана (с возможностью интеграции в систему управления верхнего блочного уровня) интеллектуальная система принятия решений на основе аппарата нечеткой логики с использованием, прогнозирующего ANFIS-подобного модуля [1]. В данной статье предлагается материал, посвященный программной реализации данной системы.

Характеристика программного комплекса

Построение программного комплекса требует выбора структуры на основе анализа поставленных перед программным обеспечением задач. С учётом разработанного математического обеспечения, реализованного в виде комплекса математических моделей [2], позволяющих производить анализ данных путём обработки входной информации, и алгоритмов, выполняющих формирование структуры системы, её оптимизацию и обеспечивающих её работу, были определены следующие основные функции [3]:

- формирование регрессионной модели в зависимости от входного информационного потока информативных данных;
- формирование нейросетевой структуры в зависимости от входного информационного потока данных;
- настройка параметров системы с целью обеспечения требуемого качества её функционирования;
- визуальное отображение информации о качестве функционирования программного обеспечения;
- обеспечения хранения данных в доступной и удобной для понимания форме;

- обеспечение хранения настраиваемых параметров системы и их динамики в процессе обучения ANFIS-подобной нейросетевой модели.

Функциональная схема разработанного программного комплекса включает в себя реализацию нескольких взаимосвязанных модулей, каждый из которых выполняет собственные задачи. Данное решение позволяет, как и интегрировать данные модули в единую систему, так и обеспечить функционирование каждого элемента самостоятельно, в зависимости от решаемых задач каждой конкретной технической

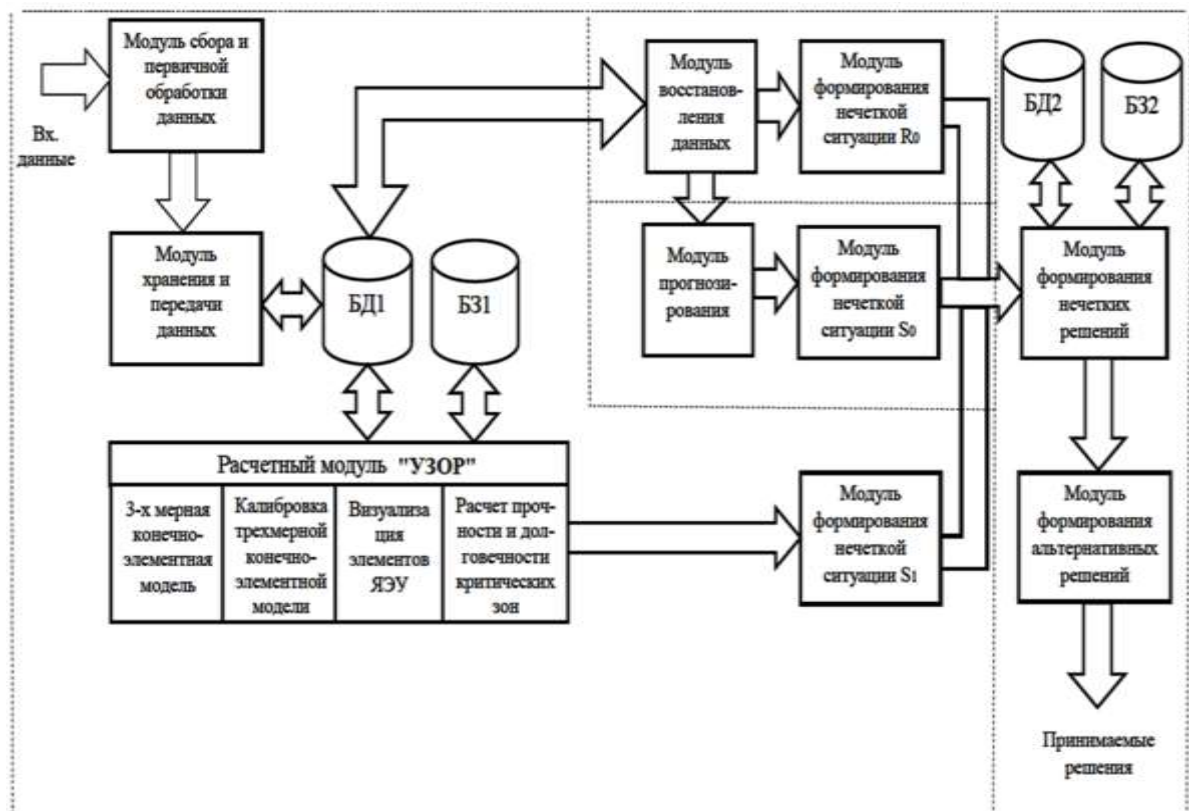


Рисунок 1– Укрупненная структура программного комплекса

реализации разработанной системы. Полная функциональная схема программного комплекса представлена на Рисунке 1.

В структуре программного комплекса выделяются четыре подсистемы:

- подсистема программной реализации непрерывного многопараметрического мониторинга состояния критического элемента энергетической установки [4]. Данная подсистема наделена широким функционалом.

Все данные о состоянии мониторируемого узла поступают в модуль сбора и первичной обработки информации, где гетерогенным информативным параметрам присваивается классификационный признак, позволяющий их четко относить к конкретному оборудованию, узлу, физическому типу. Далее модуль хранения и передачи данных производит в автоматическом режиме экспресс обработку данных с возможностью оперативной визуализации текущей информации оператору и дальнейшим занесением ее в базу данных БД1.

Расчетный модуль «Узор» является центральным ядром данной подсистемы. Данный модуль содержит программную реализацию трехмерной конечно-элементной модели, позволяющую в режиме реального времени оценивать кинетику развития эксплуатационных дефектов на основе анализа фактических параметров нагружения.

В подсистеме заложена возможность отладки и калибровки конечноэлементной модели (КЭ) на основе фактических значений контролируемых параметров (полей температур, деформаций, перемещений и т.д.). Калибровка КЭ модели производится путем сравнения расчетных данных и измеренных параметров. Если удовлетворительное совпадение расчетных и измеренных параметров (экспериментальных данных) не получено, то выполняется доработка расчетной программы, уточнение геометрии объекта контроля, сгущение КЭ сетки в определенных зонах, корректировка граничных условий и др. с целью совершенствования расчетного ядра. Как правило, после нескольких подобных итераций достигается совпадение расчетных и измеренных параметров (экспериментальных данных), что свидетельствует о работоспособности КЭ модели и адекватности моделирования процессов нагружения при прохождении различных эксплуатационных режимов [5].

В рамках данного модуля заложена возможность визуализации дефектов в реальном времени с полным предоставлением геометрии установки и цветным окрашиванием переходов численных изменений контролируемых параметров.

Далее все события, фиксируемые системой мониторинга, сопоставляются с эксплуатационными режимами, имеющими место в рассматриваемый момент времени, их характеристиками, технологическими особенностями. Это позволяет получить устойчивую обратную связь зависимости поведения дефектности узлов энергетических установок от технологических факторов и параметров и установить причинно-следственные связи, отвечающие за образование и рост

дефектов. На основе этого выполняется расчетно-экспериментальное прогнозное обоснование прочности и долговечности оборудования.

Накопленные за определенный промежуток времени база данных и база знаний по поведению мониторируемого оборудования в различных режимах эксплуатации и соответствующий комплексный анализ напряженно-деформированного состояния и поведения дефектности позволяют разработать локальные эффективные компенсирующие мероприятия, направленные на снижение влияния основных повреждающих факторов и повышение долговечности объекта мониторинга.

Использование при формировании структуры программного комплекса принципов СПРИНТ-технологии – наличие локальных БЗ1 и БД1 позволяет использовать данный модуль отдельно в рамках реализации индивидуальных систем мониторинга;

- подсистема формирования множества информативных параметров. Основное назначение данного модуля анализ входных данных и устранения проблем неполноты информации на основе реализации многомерных регрессионных моделей. В данном модуле обрабатывается поступающая на его вход матрица значений информативных параметров, имеющих корреляцию между собой. При этом оцениваются параметры регрессионной зависимости и ковариационная матрица случайных ошибок. Основой данного модуля является реализация алгоритма восстановления неполноты данных. В момент анализа параметров данный модуль фиксирует неполноту входного вектора и после получения регрессионной модели формирует дополнительное значение. Далее производится формирование регрессионной поверхности и восстановление недостающей информации;

- подсистема прогнозирования. Данный модуль реализует алгоритмы формирования прогнозных значений информативных параметров на основе ANFIS-подобной нечетко-нейронной сети. В качестве функции принадлежности используется параметризованная Гауссова кривая. Настройка параметров получается с помощью алгоритма обратного распространения ошибки. Знания в виде нечетких правил хранятся в базе правил. Вид функции принадлежности нечеткого множества конкретизируется применяемой Т-нормой, нечеткой импликацией и способом задания декартова произведения нечетких множеств. При формировании четкого решения веса связей интерпретируются как центры функций принадлежности нечетких множеств;

- подсистема принятия решений. На вход модуля принятия решений поступают три массива-ситуации, описывающие текущее и возможное прогнозное состояние исследуемого объекта. На выходе модуля есть множество альтернатив, предполагающих альтернативное развитие состояния объекта при разных входных ситуациях. Формально здесь реализуется алгоритм на основе ситуационной модели с тремя основными классическими составляющими: оценкой состояний (фаззификация); принятием решений; формированием выходного воздействия (дефаззификация). В основу функционирования модуля принятия решений нечеткой модели управления "ситуация-действие" положен принцип определения по системе продукций необходимых при данной входной ситуации управляющих решений. Набор продукционных правил хранится в БЗ2, сформированной на основе экспертных оценок [6].

Подсистема устранения неполноты информативных данных

Подсистема устранения неполноты информативных данных предназначена для выявления и восстановления потерянных или неполных данных. Структурно подсистемы состоит из трех последовательных блоков:

- блок выявления неполноты данных;
- блок формирования ковариационной матрицы;
- блок формирования недостающего значения информативного параметра.

В данном блоке производится не только вычисление ковариационной матрицы информативных данных, но и статистических характеристик анализируемого набора параметров, таких как: среднее и статистическое отклонение, дисперсионный анализ и матрица выметаний.

Данная подсистема является полностью автоматической и не имеет явной визуализации. При поступлении неполных данных происходит вычисление ковариационной матрицы. Неполные или неадекватные данные определяются путем вычисления средних отклонений и поиск единомоментного отклонения параметра от среднего. Таких отклонений может быть несколько в анализируемом наборе данных. В подсистеме зафиксирован предел неполноты данных, после которого блок остановит систему и сообщит о критичной ошибке. Дальнейшие изменения потребуют вмешательства оператора или оперативного персонала.

Пример функционирования блока восстановления неполноты информативных данных во внешний файл представлен на Рисунке 2.

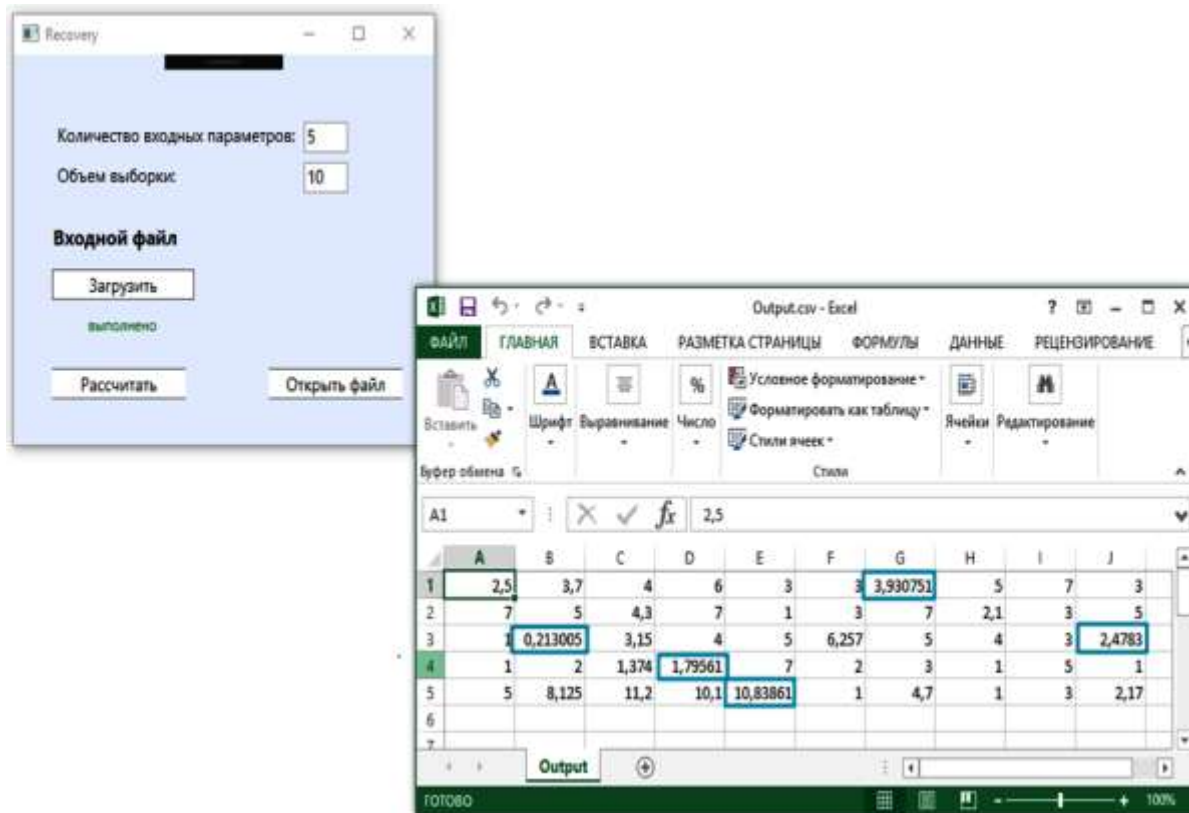


Рисунок 2 – Вывод восстановленных данных в файл

Разработанная подсистема устранения неполноты данных является ярким примером использования известных статистических методов анализа применительно к современным практическим задачам. Это обусловлено простотой разработанного программного обеспечения и высокой надежностью используемых методов.

Подсистема прогнозирования

Визуально в программном модуле прогнозирования состояния объекта на основе многопараметрического анализа выделяется три формы [7]:

- обеспечения процесса настройки системы в ручном режиме. Здесь реализована возможность зафиксировать количество входных параметров нейронной сети, количество функций принадлежности для каждого параметра и количество нечетких правил во втором слое сети;

- обучения нейронной сети. Здесь обязательна загрузка обучающей выборки и установка скорости обучения нейронной сети и ошибки прогноза. В режиме эксплуатации обучение осуществляется периодически в зависимости от поставленных задач и анализируемых информативных данных, изменения их амплитудных колебаний. Т.к. одним из недостатков прогнозирования с применением аппарата нейронных сетей является то, что прогнозное значение не может выйти за пределы амплитуды обучающей выборки, то рекомендуется отслеживать резкие колебания информативных параметров объекта и производить переобучение сети. В процессе обучения модифицируются следующие параметры – характеристики функции Гаусса в каждом входном нейроне и коэффициент дефазификации. Программный модуль также формирует количество эпох обучения и визуализацию уменьшения ошибки прогноза в процессе обучения;
- прогнозирования. В процессе эксплуатации программного модуля формирование прогнозного значения происходит дискретно с поступлением новых информативных параметров от предыдущего программного модуля. В результате функционирования программного модуля прогнозирования формируется вектор прогнозных информативных параметров, который поступает на модуль принятия решений.

Алгоритм работы с подсистемой прогнозирования приведен ниже:

1. В поле «Количество входных параметров» вводится количество уровней нечеткой нейронной сети (один уровень соответствует одному входному информативному параметру).
2. В соответствии с введенным числом формируется Таблица, в которой число строк равно количеству информативных параметров.
3. Для каждой строки (информативного параметра) необходимо заполнить следующие поля (см. Рисунок 3):

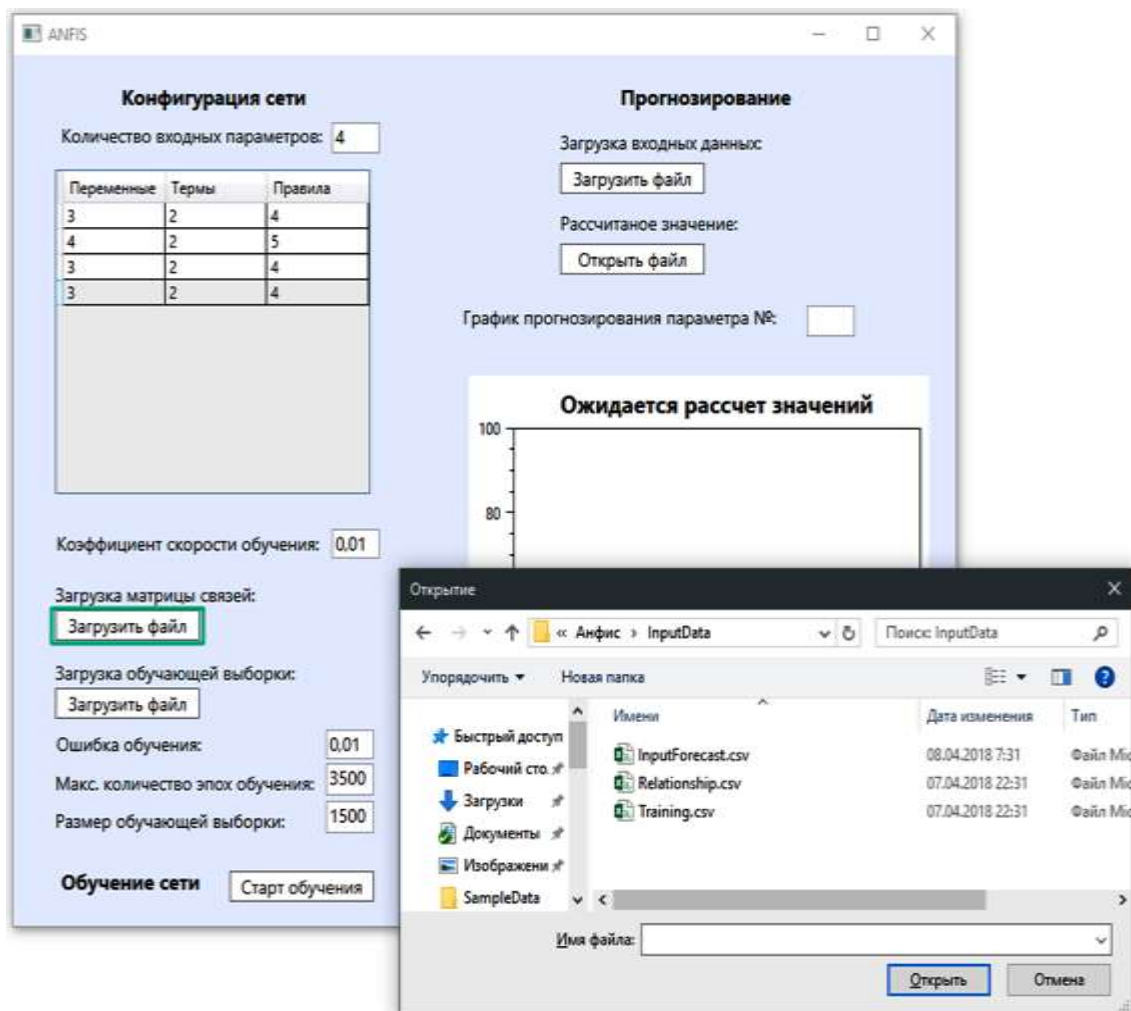


Рисунок 3 – Формирование исходных параметров

- переменные - число переменных (и входных нейронов) для соответствующего информативного параметра;
 - термы – число термов для переменных соответствующего параметра;
 - правила – число нечетко-нейронной сети правил на данном уровне;
4. Задается коэффициент скорости обучения;
 5. Задается значение ошибки обучения, при достижении которой обучение будет остановлено;
 6. Задается параметр «Максимальное количество эпох обучения», которое ограничит количество эпох, если в ходе обучения не будет достигнута установленная ошибка обучения.

7. Формируется размер обучающей выборки – количество строк, которое будет считано из файла с обучающей выборкой.
8. Загрузка матрицы связей (нечеткие правила).
9. Файл формируется вручную следующим образом:
0 – терм переменной не участвует в правиле;
1 – терм переменной участвует в правиле - одна строка – для одного уровня.
10. Загрузить файл с обучающей выборкой:

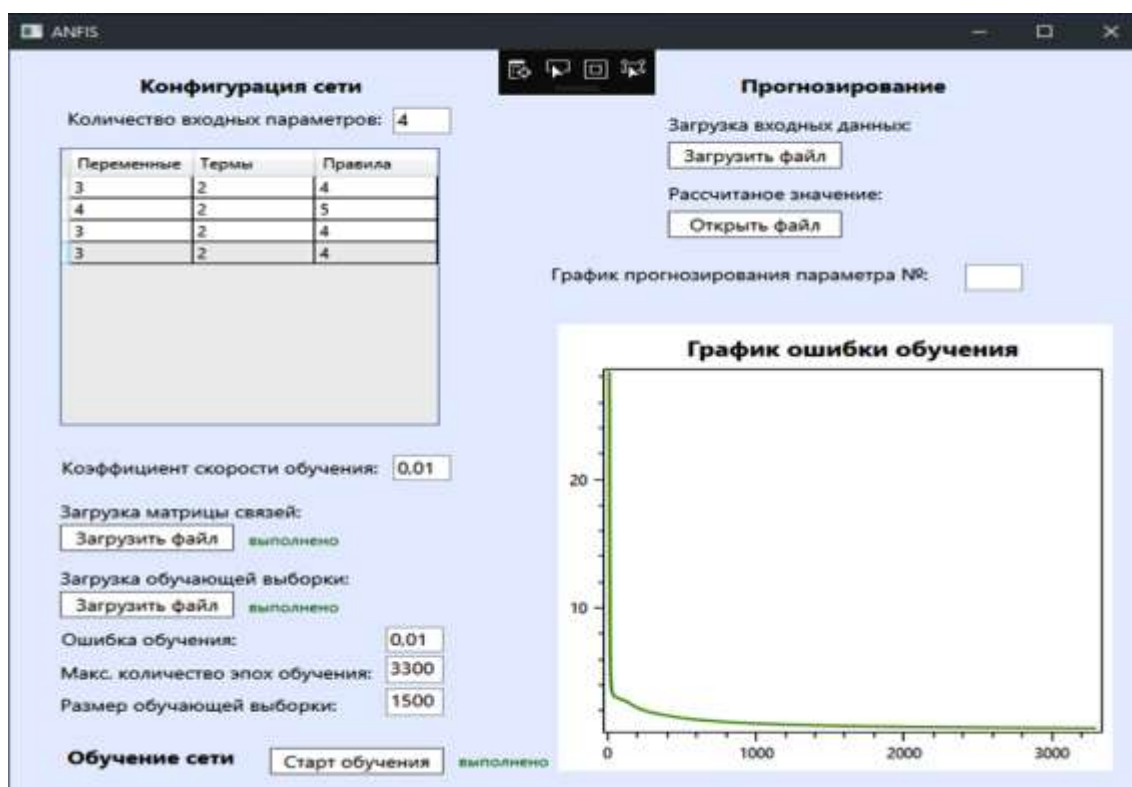


Рисунок 4 – Результат обучения подсистемы прогнозирования

Строка формируется, как показано следующим образом: сначала входные значения для нейронов первого уровня, затем для второго, третьего и эталонное выходное значение. Каждая строка соответствует одному примеру обучающей выборки.

11. Запуск обучения по кнопке «Старт обучения». На графике отображается изменение величины ошибки в зависимости от эпохи обучения (Рисунок 4).

Отметим, что экспоненциальное уменьшение ошибки обучения информативно показывает адекватное изменение

функциональных параметров нечетко-нейронной сети, что при прогнозировании повышает его качество.

12. По кнопке «Открыть файл» открывается сформированный файл, где каждая строка соответствует входным значениям информативных параметров, последнее значение – спрогнозированное значение каждого анализируемого параметра.
13. Для построения графика, необходимо ввести значение в поле «График прогнозирования параметра №». В соответствии с введенным номером будет построен график изменения значений параметра, последнее значение - спрогнозированное (Рисунок 5)

Подсистема принятия решений

Уникальностью разработанного модуля принятия решений является

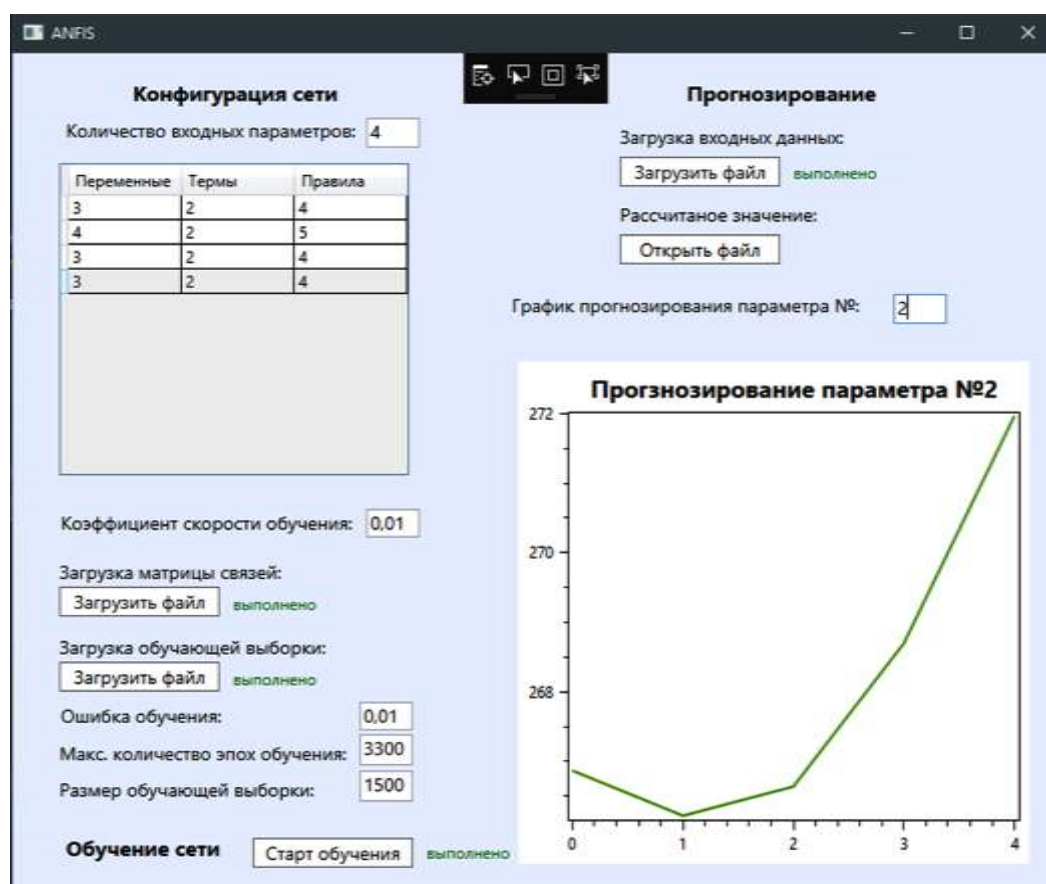


Рисунок 5 – Результат функционирования подсистемы прогнозирования

использование трех входных массивов информативных данных. Такое решение было принято по следующим причинам [6]:

- повышения качества системы принятия решений путем использования двух прогнозных значений: от ANFIS-подобной нейронной сети и от расчетного комплекса «Узор». Использование двух прогнозных значений уменьшает общую ошибку прогноза, т.к. в указанных системах прогнозирования использовались разные подходы и математические аппараты;

- использования ранее разработанного комплекса «Узор» в интеллектуальной системе поддержки принятия решений и анализ качества его функционирования путем сравнения прогнозируемых величин.

База знаний представляет собой запись из входных параметров и выходных альтернатив (решений). В разработанной системе для выбора альтернативного решения используется критерий степени равенства нечетких ситуаций.

Алгоритм работы с подсистемой принятия решений приведен ниже:

1. В поле «Количество входных параметров» вводится количество информативных параметров;

2. В соответствии с введенным числом формируется матрица, в которой число строк равно количеству параметров;

3. Для каждой строки (информативного параметра) необходимо заполнить:

- переменные – число переменных для соответствующего параметра;

- термы – число термов для переменных соответствующего параметра;

4. Загружается файл базы знаний

В случае «ручного» формирования файла:

0 – терм переменной не участвует в правиле;

1 – терм переменной участвует в правиле;

Одна строка соответствует одному правилу. В одной строке содержатся три группы значений: прогнозное значение от системы «Узор»,

прогнозное значение от описанной выше подсистемы прогнозирования и текущие значения информативных параметров. Каждая группа включает в себя значения термов каждой переменной для всех параметров, последнее значение – заключение правила.

5. По кнопкам «С» и «W» загружаются коэффициенты для функций принадлежности каждого терма каждой переменной всех параметров. Строка формируется следующим образом: сначала значения для термов переменных первого параметра, затем второго, третьего и т.д.

Рисунок 7 – База принятия решений

6. Загрузка входных данных (Рисунок 6). Строка формируется следующим образом: сначала входные значения переменных первого параметра, затем второго, третьего и т.д.

7. По кнопке «Рассчитать» осуществляется перебор всех правил, вычисляется соответствие входного набора данных каждому правилу, находится максимальное соответствие, выводится номер правила и действие, содержащееся в заключении правила. На Рисунке 7 показан пример базы решений в соответствии с входными параметрами подсистемы.

Заключение

В результате разработки программного комплекса для реализации интеллектуальной системы принятия решений в задачах управления потенциально опасными объектами ядерной энергетики было повышено качество принятия решений за счет оперативности и достоверности обрабатываемой информации, а так же за счет снижения общей ошибки прогноза при сравнении прогнозируемых величин от трех разных модулей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Danilov A. Intellectual decision-making system in the context of potentially dangerous nuclear power facilities [Text] /A. Danilov, V. Povarov, V. Burkovsky, S. Podvalny and K. Gusev// MATEC Web of Conferences Volume 161 (2018).
2. Поваров В.П. Алгоритмы принятия решений в задачах управления сроком службы объектов ядерной энергетики [Текст] / В.П. Поваров, М.Б. Бакиров, А.Д. Данилов // Вестник ВГТУ. -2018.- Т.14.-№ 1.- С. 49-58.
3. Поваров В.П. Обобщенная структура системы принятия решений в условиях потенциально опасных объектов атомной энергетики [Текст] / В.П. Поваров // Вестник ВГТУ. -2018.- Т.14.-№ 2.- С. 51-56.
4. Поваров В.П. Программно-технический комплекс непрерывного мониторинга эксплуатационной повреждаемости оборудования ядерных энергетических установок [Текст] / В.П. Поваров, М.Б. Бакиров, А.Д. Данилов // Вестник ВГТУ. – 2017. – Т. 13. – №. 6. – С. 58–63.

5. Поваров В.П. Автоматизированная система многопараметрического мониторинга параметров состояния энергетических установок АЭС [Текст]/ В.П. Поваров, М.Б. Бакиров, А.Д. Данилов. Воронеж: Научная книга, 2017.- 245 с.
6. Поваров В.П. Принципы разработки систем принятия решений в задачах управления ядерными блоками [Текст] / В.П. Поваров // Вестник ВГТУ. -2018.- Т.14.-№ 2.- С. 87-91.
7. Povarov, V. Data support system for controlling decentralised nuclear power industry facilities through uninterruptible condition monitoring [Text] / V. Povarov, A. Danilov, V. Burkovsky and K. Gusev// MATEC Web of Conferences Volume 161 (2018).

V. P. Povarov

SOFTWARE IMPLEMENTATION INTELLIGENT SYSTEMS DECISION-MAKING WHEN MANAGING NUCLEAR ENERGY FACILITIES

*The branch of JSC "Concern Rosenergoatom" "Novovoronezh
nuclear power plant", Novovoronezh, Russia*

The work is devoted to the development of the software complex of the intellectual decision-making system in the problems of management of the processes of functioning of nuclear power facilities. It is shown that the construction of the software complex requires the choice of structure based on the analysis of the tasks assigned to the software. Taking into account the developed mathematical software, implemented in the form of a set of mathematical models that allow to analyze data by processing the input information, and algorithms that perform the formation of the system structure, its optimization and ensure its operation, the following main functions were identified and implemented: the formation of a regression model depending on the input information flow of informative data; the formation of a neural network structure depending on the input information flow of data; configuration of system parameters in order to ensure the required quality of its functioning; visual display of information about the quality of the software; providing data storage in an accessible and easy to understand form; providing storage of configurable system parameters and their dynamics in the learning process ANFIS-like neural network model. The proposed engineering solutions have improved the quality of decision-making due to the efficiency and reliability of the processed information, as well as by reducing the overall error of the forecast.

Keywords: decision-making system, multiparameter monitoring, forecasting, database, knowledge base, fuzzy neural network

REFERENCES

1. Danilov A. Intellectual decision power [Text] / A. Danilov, V. Povarov, V. Burkovsky, S. Podvalny and K. Gusev // MATEC Web of Conferences Volume 161 (2018).
2. Povarov V.P. Decision-making algorithms for managing the lifetime of nuclear power facilities [Text] / V.P. Povarov, MB Bakirov, A.D. Danilov // VSTU Bulletin. -2018.- Т.14.-№ 1.- P. 49-58.
3. Povarov V.P. Generalized structure of the decision-making system in the conditions of potentially hazardous nuclear energy facilities [Text] / V.P. Povarov // VSTU Bulletin. -2018. Т.14.-№ 2.- P. 51-56.
4. Povarov V.P. Software and hardware complex for continuous monitoring of the operational damageability of equipment of nuclear power plants [Text] / V.P. Povarov, MB Bakirov, A.D. Danilov // VSTU Bulletin. - 2017. - V. 13. - №. 6. - p. 58–63.
5. Povarov V.P. Automated system of multiparameter monitoring of parameters of the state of NPP power plants [Text] / V.P. Povarov, MB Bakirov, A.D. Danilov. Voronezh: Scientific book, 2017.- 245 p.
6. Povarov V.P. Principles of development of decision-making systems in the tasks of managing nuclear units [Text] / V.P. Povarov // VSTU Bulletin. - 2018.- V. 14.-№ 2.- P. 87-91.
7. Povarov, V. Data support system for the control of unregulated conditions. V. Povarov, A. Danilov, V. Burkovsky and K. Gusev // MATEC Web of Conferences Volume 161 (2018) .