

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ НЕЧЁТКИХ МНОЖЕСТВ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ И ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ

О.В. Крюков

Рассмотрена общая характеристика и математический аппарат теории нечётких множеств для решения прикладных задач оптимизации систем автоматического управления и мониторинга объектов со стохастическими возмущениями. Обоснованы преимущества и возможности аппарата fuzzy-систем для формализации и моделирования объектов с комбинированными и инвариантными структурами регулирования. Приведены общие понятия и методология получения алгоритмов нечёткого управления и диагностирования объектов со стохастическими возмущениями, а также подходы по прогнозированию технического состояния объектов повышенной опасности. Представлены практические примеры реализации методики нечёткого прогнозирования основных технологических установок магистрального транспорта газа. Результаты полученных алгоритмов с использованием нечёткой модели Бокса – Дженкинса сопоставлены с альтернативными методами искусственных нейронных сетей и спектрального анализа, в частности, анализа динамики спектральных составляющих или временных рядов.

**Ключевые слова:** аппарат теории нечётких множеств, нечёткая логика, алгоритм нечёткого управления, нечёткое прогнозирование, интеллектуальный датчик, электроприводной газоперекачивающий агрегат.

### Общая характеристика теории нечётких множеств

В последнее время нечёткая технология завоевывает все больше сторонников среди разработчиков систем автоматического управления и мониторинга объектов высокой сложности [1 – 5]. Особенно это актуально для систем, находящихся под воздействием стохастических возмущений различной природы [6 – 8]. Взяв старт в 1965 г. из работ профессора Лотфи Заде [9, 10], за прошедшее время нечёткая логика прошла путь от антинаучной теории, отвергнутой в Европе и США, до банальной ситуации конца 90-х гг, когда в Японии появились «нечёткие» бритвы, пылесосы, фотокамеры, а в ФРГ принята национальная программа по обучению принципам нечёткой логики. Сам термин «fuzzy-logic» так прочно вошёл в жизнь, что на многих языках он не переводится. В России можно вспомнить рекламу стиральных машин и микроволновых печей фирмы «Samsung», обладающих искусственным интеллектом на основе нечёткой логики.

На рис. 1 показаны области наиболее эффективного применения современных технологий управления. Как видно, классические методы управления хорошо работают при полностью детерминированном объекте управления и детерминированной среде, а для систем с неполной априорной информацией и высокой сложностью объекта управления оптимальными являются нечёткие методы управления. Далее с усложнением объектов и возмущений типа «белый шум» целесообразно применять технологии искусственных нейронных сетей (ИНС) [11].



Рис. 1. Области наиболее эффективного применения методов анализа и управления

Появление новых способов анализа и управления объектами энергетических систем обусловлено тем, что при проектировании и эксплуатации сложных объектов приходится сталкиваться с одним и тем же комплексом проблем, не всегда полностью поддающихся решению традиционными методами. Неполнота знаний о внешних воздействиях, неизбежная погрешность датчиков, непредсказуемость реальных ситуаций – всё это заставляет создавать интеллектуальные системы, способные оптимально работать в условиях неопределённости и нечёткости исходной информации. Кроме того, проблема больших размерностей становится реальным сдерживающим фактором при проектировании сложных задач и формализации их в общей системе уравнений.

В свою очередь, системы, функционирующие на основе теории нечётких множеств, оказываются в состоянии реализовать все вышеизложенные проблемы. Это связано с тем, что нечёткая логика – это математический аппарат, оперирующий лингвистическими переменными с помощью правил, понятных человеку и близких по структуре к обычному разговорному языку. Преимущества и возможности fuzzy-систем по сравнению с другими:

- оперирование нечёткими входными данными с непрерывно изменяющимися во времени значениями (динамические задачи) или значениями, которые невозможно задать однозначно (статистические данные, вероятностные параметры);
- нечёткая формализация критериев оценки и сравнения с оперированием показателями «большинство», «возможно», «преимущественно»;
- проведение качественных экспресс-оценок входных данных и выходных результатов с оперированием не только значениями данных, но и их степенью достоверности и её распределением;
- быстрое моделирование сложных динамических систем и их сравнительный анализ с заданной степенью точности с оценкой разных вариантов выходных значений.

При описании объектов и явлений с помощью нечётких множеств используются понятия нечёткой и лингвистической переменных [12].

Обычно нечёткая переменная характеризуется тройкой  $\langle \alpha, X, A \rangle$ , где  $\alpha$  – имя переменной;  $X$  – универсальное множество (область определения  $\alpha$ );  $A$  – нечёткое множество на  $X$ , описывающее ограничение на значение  $\alpha$ .

Лингвистической переменной является набор  $\langle \beta, T, X, G, M \rangle$ , где  $\beta$  – имя лингвистической переменной;  $T$  – множество его значений (базовое термножество), представляющих имена нечётких переменных, областью определения которых является множество  $X$ ;  $G$  – синтаксическая процедура, позволяющая оперировать элементами термножества или генерировать новые термы;  $M$  – семантическая процедура для преобразования нового значения  $\beta$  в нечёткую переменную и формирования нечёткого множества.

### Основы теории нечётких множеств

*Нечёткое множество (fuzzy set)* представляет собой совокупность элементов произвольной природы, относительно которых нельзя с полной определённоностью утверждать – принадлежит ли тот или иной элемент данному множеству или нет. Поэтому нечёткое множество отличается от обычного тем, что для части его элементов нет одно-

значного ответа на вопрос: «Обладают ли элементы объекта некоторым характеристическим свойством, которое может быть использовано для задания нечёткого множества?».

Для построения нечётких моделей систем понятие нечёткого множества определяется более строго для того, чтобы исключить неоднозначность толкования свойств. Существуют несколько вариантов формального определения нечёткого множества, которые различаются между собой способом задания характеристической функции данных множеств. Среди этих вариантов наиболее естественным является задание области значений подобной функции как интервал действительных чисел, заключённых в границах диапазона  $[0, 1]$ .

Формально нечёткое множество  $A$  определяется как множество упорядоченных пар или кортежей вида:  $\langle x, \mu_A(x) \rangle$ , где  $x$  – элемент некоторого универсального множества или универсума  $X$ ;  $\mu_A(x)$  – функция принадлежности, которая ставит в соответствие каждому из элементов  $x$  некоторое действительное число из интервала  $[0, 1]$ .

При этом значение  $\mu_A(x) = 1$  для некоторого  $x$  означает, что элемент  $x$  определённо принадлежит нечёткому множеству  $A$ . Значение  $\mu_A(x) = 0$  означает, что элемент  $x$  определённо не принадлежит нечёткому множеству  $A$ .

В литературе по теории нечётких множеств [12] можно встретить не только различные определения, но и разнообразные обозначения для нечётких множеств. В ранних работах отечественных авторов по данной тематике нечёткие множества иногда назывались «расплывчатыми». Бесконечные нечёткие множества иногда записывают со знаком интеграла, но сам знак интеграла может быть воспринят как нечёткий интеграл, чем он не является. Из всех нечётких множеств выделим два частных случая, которые по сути совпадают со своими классическими аналогами и используются в дальнейшем при определении других нечётких понятий.

*Пустое нечёткое множество.* В теории нечётких множеств сохраняют свой смысл некоторые специальные классические множества. В этой связи характеристическая функция обычного пустого множества также тождественно равна нулю для каких бы то ни было элементов:  $0$ .

*Универсум,* обозначаемый через  $X$ , используется в качестве обычного множества, содержащего все возможные элементы. Формально удобно считать, что функция принадлежности универсума как нечёткого множества тождественно равна единице для всех без исключения элементов:  $\mu_x = 1$ .

Носителем нечёткого множества  $A$  является обычное множество  $A_s$ , которое содержит только те элементы универсума, для которых значения функции принадлежности нечёткого множества отличны от нуля.

### Нечёткое управление объектами

В задачах управления обычно требуется алгоритм, который наилучшим образом подходил бы для данного объекта. Основные требования к алгоритмам – это высокая скорость, простота реализации, малая требуемая вычислительная мощность и т. д. Если объект управления может быть представлен только сложной математической моделью, то её обычно упрощают с потерей адекватности модели её физическому аналогу, который связан с её нечётким, лингвистическим характером (большой, высокий, очень быстрый и т. д.).

Преимуществом нечёткого регулирования является быстрота обработки информации и реализации, лёгкость составления правил. Используемый в различного рода экспертных и управляющих системах механизм нечётких выводов в своей основе имеет базу знаний, формируемую специалистами предметной области в виде совокупности нечётких предикатных правил. Общий логический вывод осуществляется за следующие четыре этапа [1, 12]:

1. *Нечёткость* (введение нечёткости, фаззификация, fuzzification). Функции принадлежности, определённые на входных переменных, применяются к их фактическим значениям для определения степени истинности каждой предпосылки каждого правила.

2. *Логический вывод*. Вычисленное значение истинности для предпосылок каждого правила применяется к заключениям каждого правила. Это приводит к одному нечёткому подмножеству, которое будет назначено каждой переменной вывода для каждого правила. В качестве правил логического вывода обычно используются только операции  $\min$  (минимум) или  $\text{prod}$  (умножение).

3. *Композиция*. Нечёткие подмножества, назначенные для каждой переменной вывода, объединяются вместе, чтобы сформировать одно нечёткое подмножество для каждой переменной вывода. При подобном объединении обычно используются операции  $\max$  (максимум) или  $\text{sum}$  (сумма).

4. *Приведение к чёткости* (дефаззификация, defuzzification), которое используется, когда полезно преобразовать нечёткий набор выводов в чёткое итоговое число.

Архитектура или модель нечёткого управления основана на замене классической системы управления системой нечёткого управления, в качестве которой используются системы нечёткого вывода. В этом случае модель нечёткого управления строится с учётом необходимости реализации всех этапов нечёткого вывода, а сам процесс вывода реализуется на основе алгоритмов нечёткого вывода.

В большинстве задач на выходе необходимо получение не нечётких значений лингвистических переменных, а вполне определённых «чётких» значений (конкретные цифры, управляющие сигналы). Для этой цели выходные переменные необходимо привести к чёткости – дефаззифицировать. Для этой цели и служит последний блок – блок дефаззификации.

### Применение теории нечётких множеств при прогнозировании и обработке данных

Аппарат теории нечётких множеств нашёл применение не только в задачах управления, но и также в задачах обработки данных, прогнозирования, оптимизации, кластеризации и т. д. Особенно много упоминаний применения аппарата теории нечётких множеств в таких сферах, как управление и мониторинг [4, 5]. В электроэнергетике прогнозирование с помощью аппарата теории нечётких множеств применяется при расчёте нагрузок, потерь в линиях.

Любое решение о состоянии системы сопровождаются два вида неопределённости: неопределённость о будущем состоянии системы (задача прогнозирования) и неопределённость в ходе классификации уровня системных параметров (задача распознавания).

Задача прогнозирования параметров системы иногда решается с применением теории вероятностей. Однако без надлежащего обоснования применимости вероятностей для моделирования существенно ограниченной и неоднородной статистической выборки, вероятностные методы прогнозирования применяться не могут. В большинстве случаев такое обоснование получить не удаётся, как и в задачах распознавания.

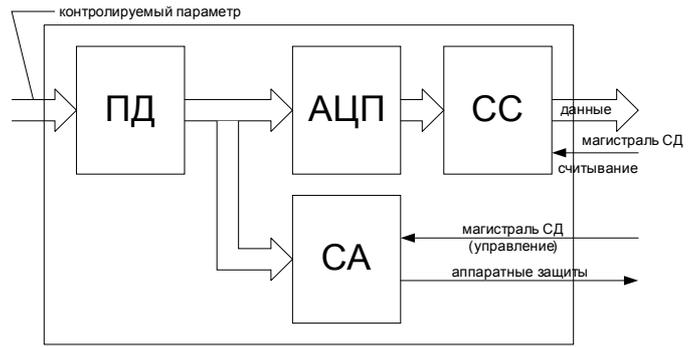
Поэтому возникает потребность в эффективном инструменте борьбы с информационной неопределённостью при принятии управленческих решений. Такой инструмент должен уметь принимать во внимание все имеющиеся в наличии данные, а также отражать информацию о степени уверенности эксперта в прогнозе или в оценке. Все эти требования удовлетворяются формализацией теории нечётких множеств.

Подобные технологии нечёткой логики были успешно апробированы в области ветроэнергетики [1 – 3, 13], где основной стохастической переменной являются параметры климатки и ветра. В последнее время появились публикации и диссертации, посвящённые использованию теории нечётких множеств для прогнозирования технического состояния особо опасных объектов электроэнергетики, и в частности электроприводных газоперекачивающих агрегатов (ЭГПА) [14, 15] и нагрузок систем электропитания [16, 17], для расчёта потерь электроэнергии и определения оптимального потока мощности (OPF – the Optimal power flow) и т. д.

**Практические примеры прогнозирования**

Для работы в режиме реального времени целесообразно использовать алгоритмы нечёткой логики с языковым синтаксисом, использующим лингвистические переменные и уровни – «нулевой», «положительный большой», «отрицательный малый», «положительный средний» и т. д. [18, 19].

Первичными источниками информации для такой системы могут служить интеллектуальные датчики (рис. 2) на базе серийных термопреобразователей (рис. 3), а её обработка производится на нечётких контроллерах [20]. Для составления алгоритма мониторинга используется предварительная фаззификация текущих измеряемых переменных и их скоростей изменения. По полученным лингвистическим величинам текущего значения параметра и скорости его изменения определяется прогнозируемое значение каждого фактора.

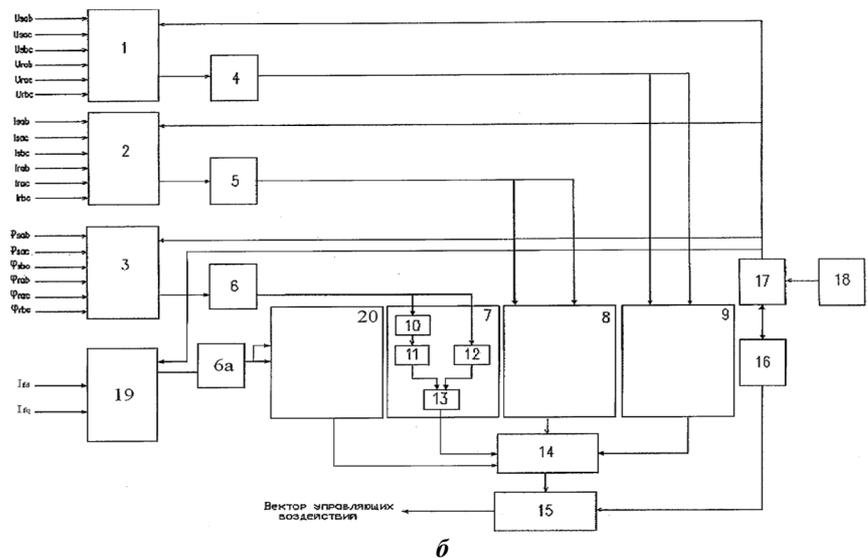
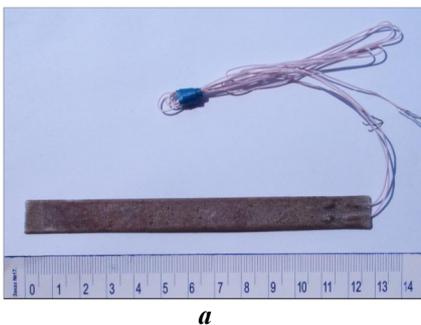


**Рис. 2. Схема интеллектуального датчика: ПД – первичный датчик; СА – схема анализа; СС – схема сопряжения с системой управления ЭГПА**

На функциональной схеме датчика обозначено: 1, 2, 3, 19 – входные мультиплексоры; 4, 5, 6, 6а – блоки выделения модуля сигнала; 7, 8, 9, 20 – блоки прогнозирования значения сигнала; 10 – блок ассоциативной оценки терм-значений сигналов; 11 – модуль памяти; 12 – дифференциатор; 13 – блок оценки скорости изменения сигналов; 14 – блок оценки модуля сигнала; 15 – блок оценки терм-значений; 16 – счётчик; 17 – дешифратор; 18 – генератор тактовых импульсов;

Для составления алгоритма мониторинга используется предварительная фаззификация текущих измеряемых переменных и их скоростей изменения. По полученным лингвистическим величинам текущего значения параметра и скорости его изменения определяется прогнозируемое значение каждого фактора (рис. 4).

**Рис. 3. Общий вид датчика температуры и частичных разрядов (а) и функциональная схема интеллектуального датчика прогнозирования (б)**



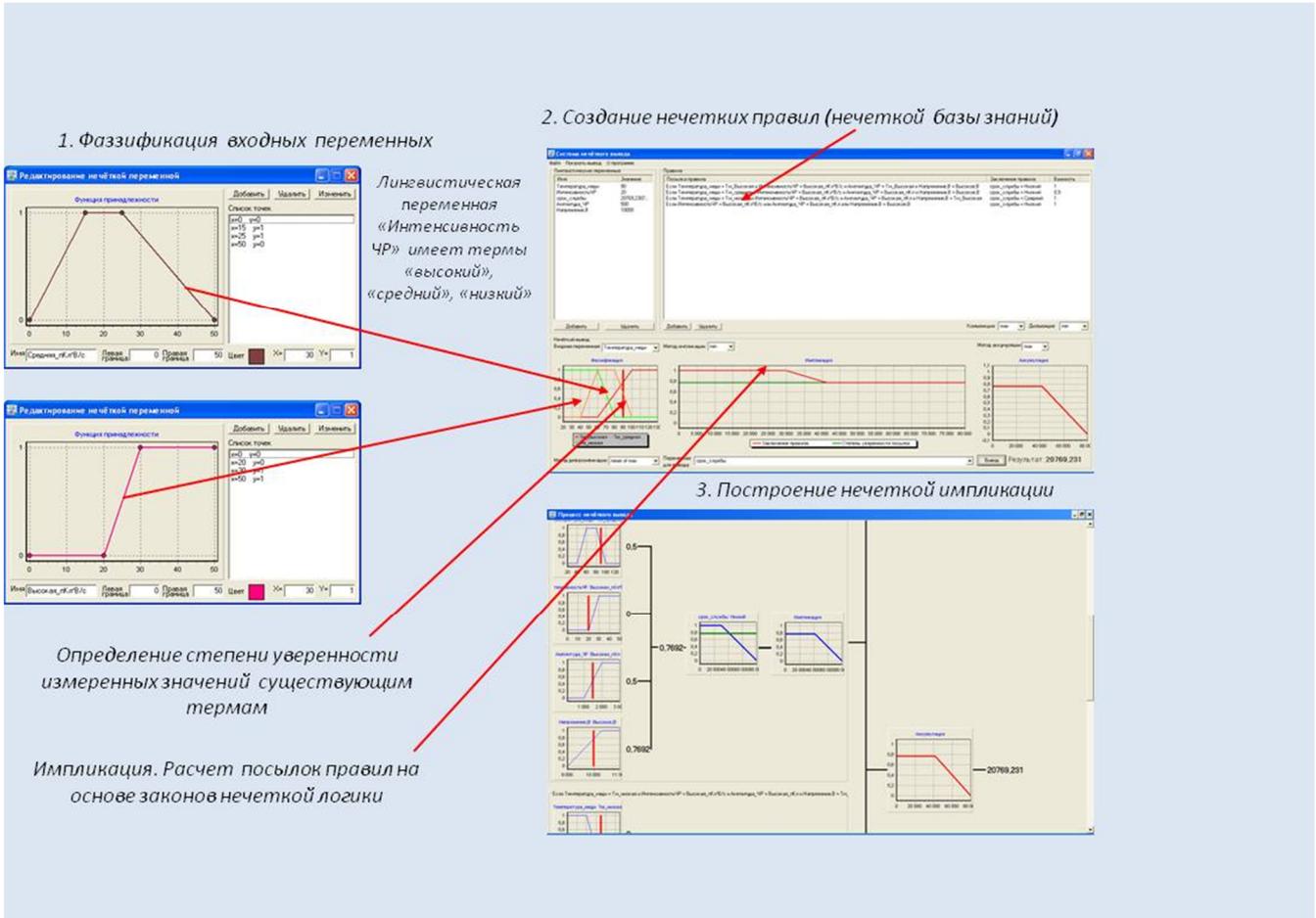


Рис. 4. Процедура получения нечёткой импликации. Сопоставление результатов прогнозирования состояния ЭГПА

Для сопоставления достоверности результатов прогнозирования состояния приводных машин ЭГПА различными методами рассмотрим тренд, описывающий суточные колебания температуры статора СТД-12500-2 в процессе эксплуатации ЭГПА (рис. 5, кривая *a*) и произведём анализ эффективности инерционных прогностических методов. Для этого известный временной ряд, описывающий изменение температуры, разобьём на две части, первая из которых будет являться основанием прогноза, а вторая – для проверки апостериорной точности прогноза.

Применение методов на основе нечётких ARMA-моделей, в частности, использовался метод Бокса – Дженкинса, так как числовой ряд разностей первого порядка температурного временного ряда является стационарным. Из графика (рис. 5) видно, что методы на основе моделей Бокса – Дженкинса дают очень оптимистичный прогноз с возрастающим трендом (кривая *б*). На основе полученных данных нельзя достоверно определить момент выхода значений температуры за допустимые

пределы. Значение средней относительной ошибки прогноза составило 23 – 58 % ( $\bar{\Delta} = 0,23 - 0,58$ ).

Также для проверки эффективности использовался вышеописанный метод на основе ИНС. Для этого использовалась сеть Ворда, на входы которой подавались предыдущие значения временного ряда. Выбор именно этого типа связан с тем, что ИНС данного типа способны производить классификацию значимости входных значений. Моделирование показало, что построенная и обученная ИНС на границе неопределённости температурного временного ряда позволяет определить общую тенденцию повышения температуры, но даёт пессимистичный прогноз (кривая *б*). В результате можно определить тенденции развития процесса, но достоверно определить момент выхода значений температуры за пределы допустимых значений нельзя. Значение средней относительной ошибки прогноза составило 16 – 46% ( $\bar{\Delta} = 0,16 - 0,46$ ).

Для прогнозирования тренда температуры методом временных рядов (АДСС) [1, 12] использовалась предыстория температурного ряда размером  $N=400$

отсчётов. Полученный многошаговый прогноз (кривая  $z$ ) позволяет выделить возрастающую тенденцию ряда и с высокой точностью определить момент выхода значений температуры за допустимые границы. Значение средней относительной ошибки прогноза составило  $8 - 34\%$  ( $\bar{\Delta} = 0,08 - 0,34$ ).

На основании проведённых исследований можно сделать вывод, что использование метода временных рядов позволяет делать более точные прогнозы относительно дрейфа температуры статоров СТД-12500-2 по сравнению с применяемыми методами на основе прогнозных моделей и ИНС.

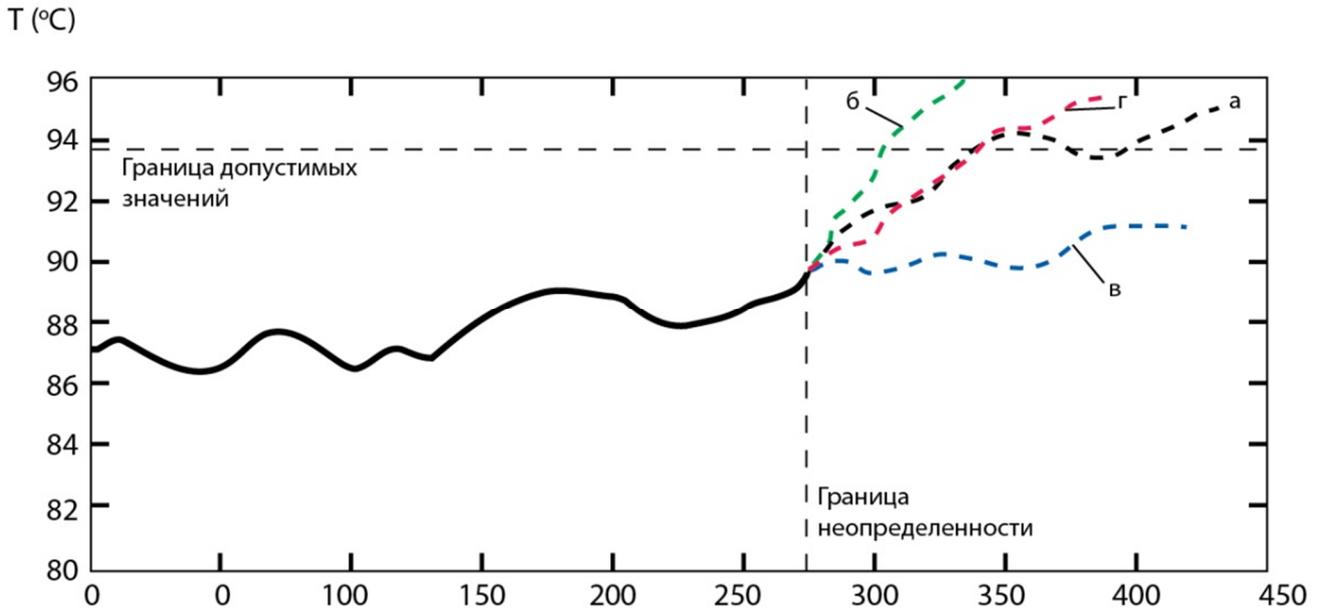


Рис. 5. Прогнозирование температуры статора электродвигателя СТД-12500-2:  $a$  – фактический температурный ряд;  $b$  – прогноз, полученный с использованием ИНС (сеть Ворда);  $в$  – прогноз, полученный с использованием модели Бокса – Дженкинса;  $z$  – прогноз, полученный с использованием метода АДСС

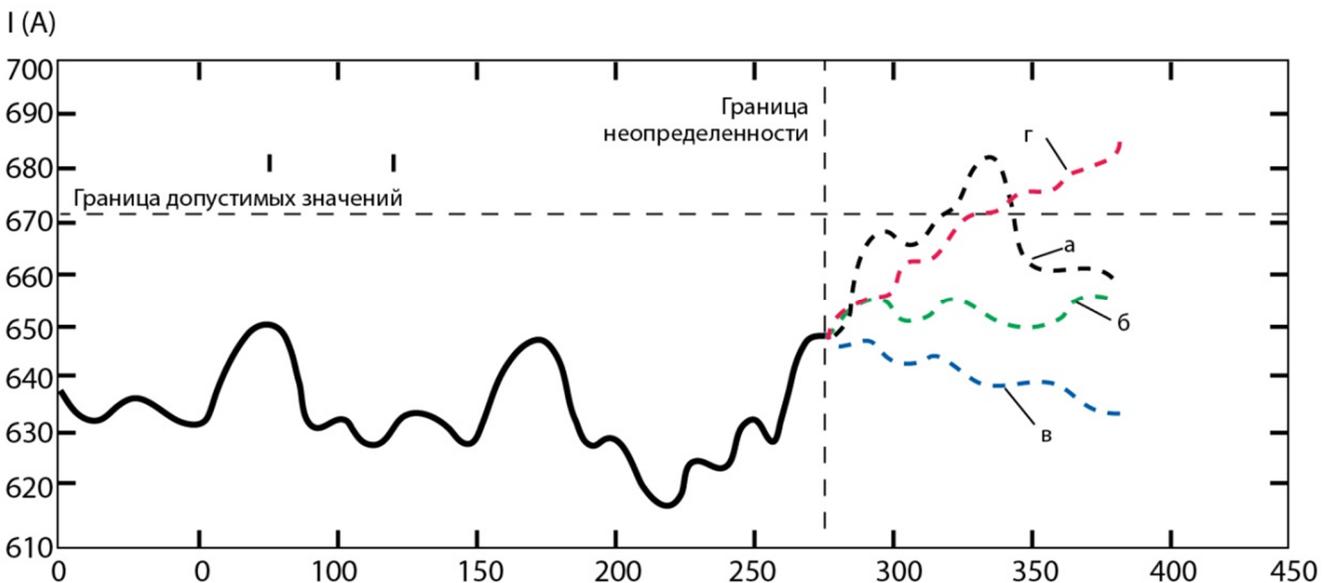


Рис. 6. Прогнозирование тока статора электродвигателя СТД-12500-2:  $a$  – фактический временной ряд;  $b$  – прогноз, полученный с использованием ИНС (Ворда);  $в$  – прогноз, полученный с использованием модели Бокса – Дженкинса;  $z$  – прогноз, полученный с использованием метода временных рядов

Аналогичные результаты получены при сопоставлении прогнозирования токов статора СТД-12500-2 (рис. 6) методами Бокса – Дженкинса (кривая *в*) с ошибкой 34 – 127%, ИНС Ворда (кривая *б*) с ошибкой 27 – 84% и метод временных рядов АДСС (кривая *з*) с ошибкой 11 – 58%.

Однако спецификой функционирования ЭГПА является большая инерционность (постоянные времени), включая изменения тепловых режимов и параметров частичных разрядов. Поэтому рациональный выбор метода прогнозирования технического состояния конкретного ЭГПА определяется совокупностью условий, режимов работы магистральных газопроводов и различными системными особенностями функционирования газоперекачивающей техники на компрессорных станциях.

### Выводы

1. Приведённый анализ особенностей и преимуществ применения нечёткой логики для сложных объектов со стохастическим характером возмущений показал целесообразность его применения при решении задач управления и мониторинга технического состояния.

2. Разработанная методика и система нечёткой логики для прогноза состояния электроприводных газоперекачивающих агрегатов показала свою адекватность и возможность её применения на реальных объектах компрессорных станций магистральных газопроводов.

3. Результаты исследований прогностических моделей на основе методов нечёткой логики (Бокса – Дженкинса) и ИНС (сети Ворда) при прогнозировании технического состояния машин СТД-12500 в случае развития постепенных отказов показали, что они дают более точные результаты по сравнению с традиционными методами экстраполяции и позволяет принимать более адекватные и своевременные решения. Рациональный выбор метода прогнозирования технического состояния объектов определяется совокупностью условий, режимами работы и системными особенностями функционирования установок.

### Литература

1. Пужайло А. Ф., Спиридович Е. А., Воронков В. И. Энергосбережение и автоматизация электрооборудования компрессорных станций: монография / А. Ф. Пужайло и др. / под ред. д.т.н. О. В. Крюкова. – Н. Новгород : Вектор ТиС, 2010. – 560 с.
2. Крюков О. В., Степанов С. Е. Повышение устойчивости работы электроприводов центробежных нагнетате-

- лей на компрессорных станциях ОАО «Газпром» // Газовая промышленность. – 2014. – № 8 (710). – С. 50 – 56.
3. Крюков О. В. Стратегии инвариантных систем управления электроприводами объектов ОАО «Газпром» // Идентификация систем и задачи управления SICPRO'15: Сборник. – М. : Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова, 2015. – С. 368 – 386.
4. Серебряков А. В., Крюков О. В., Васенин А. Б. Нечёткие модели и алгоритмы управления ветроэнергетическими установками // Материалы конференции «Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах» / под ред. С. Н. Васильева. – М. : ИПУ РАН, 2012. – С. 467 – 469.
5. Крюков О. В., Киянов Н. В. Электрооборудование и автоматизация водооборотных систем предприятий с вентиляторными градирнями: монография / О. В. Крюков, Н. В. Киянов. – Н. Новгород : НГТУ, 2007. – 260 с.
6. Захаров П. А., Крюков О. В. Методология инвариантного управления агрегатами компрессорных станций при случайных воздействиях // Известия вузов. Электромеханика. – 2009. – № 5. – С. 64 – 70.
7. Захаров П. А., Крюков О. В. Принципы инвариантного управления электроприводами газотранспортных систем при случайных возмущениях // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2008. – № 2. – С. 98 – 103.
8. Kryukov O. V. Electric drive systems in compressor stations with stochastic perturbations // Russian Electrical Engineering. – 2013. – Vol. 84. – P. 135 – 138.
9. Zade L. A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. Part 1, 2, 3 // Information Sciences. – N 8. – P. 199 – 249; 301 – 357; N 9. – P. 43 – 80.
10. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближённых решений // Пер. с англ. Н. И. Ринго / под ред. Н. Н. Моисеева и С. А. Орловского. – М. : Мир, 1976. – 165 с.
11. Крюков О. В. Методология и средства нейро-нечёткого прогнозирования состояния электроприводов газоперекачивающих агрегатов // Электротехника. – 2012. – № 9. – С. 52 – 57.
12. Крюков О. В. Прикладные задачи теории планирования эксперимента для инвариантных объектов газотранспортных систем // Труды IX Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления», SICPRO'12. – М. : ИПУ. – 2012. – С. 222 – 236.
13. Крюков О. В., Серебряков А. В. Система оперативной диагностики технического состояния ветроэнергетических установок // Электротехника. – 2015. – № 4. – С. 49 – 53.
14. Бабичев С. А., Бычков Е. В., Крюков О. В. Анализ технического состояния и безопасности электроприводных газоперекачивающих агрегатов // Электротехника. – 2010. – № 9. – С. 30 – 36.
15. Бабичев С. А., Захаров П. А., Крюков О. В. Автоматизированная система оперативного мониторинга привод-

- ных двигателей газоперекачивающих агрегатов // Автоматизация в промышленности. – 2009. – № 6. – С. 3 – 6.
16. Крюков О. В., Горбатушков А. В., Степанов С. Е. Принципы построения инвариантных электроприводов энергетических объектов // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника. Труды IV ВНИПК / под общ. ред. В. Ю. Островляничка. – Новокузнецк, 2010. – С. 38 – 45.
17. Киянов Н. В., Крюков О. В., Прибытков Д. Н., Горбатушков А. В. Концепция разработки инвариантных автоматизированных электроприводов для водооборотных систем с вентиляторными градириями // Электротехника. – 2007. – № 11. – С. 62 – 67.
18. Крюков О. В. Виртуальный датчик нагрузки синхронных машин // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 3. – С. 45 – 50.
19. Киянов Н. В., Крюков О. В., Захаров П. А., Бабищев С. А., Сыса А. Ю. Устройство лингвистического диагностирования отказов асинхронного электропривода. Патент РФ на полезную модель. – RU № 91636. – Оpubл. 05.10.2009.
20. Крюков О. В., Васенин А. Б., Серебряков А. В. Экспериментальный стенд электромеханической части ветроэнергетической установки // Приводная техника. – 2012. – № 4. – С. 2 – 11.

Поступила в редакцию 15.04.2016

Олег Викторович Крюков, главный специалист, д-р техн. наук,  
АО «Гипрогазцентр» (г. Нижний Новгород),  
т. (831) 428-25-84, факс. 25-092, e-mail: o.kryukov@ggc.nnov.ru.

## APPLICATION of the FUZZY-SET THEORY for DATA PREDICTION AND PROCESSING

O.V. Kriukov

*Given below is the general description and mathematical tools of the fuzzy-set theory for handling of applied problems of optimization of the automated control systems of monitoring objects with stochastic perturbations. Article describes advantages and capabilities of the fuzzy-systems apparatus to formalize and design objects with combined and non-variant regulating structures. Article also demonstrates the general principles and methodology of obtaining fuzzy control algorithms, performing diagnostics of objects with stochastic perturbations as well as the ways of predicting technical condition of high-risk objects. Practice-oriented examples are given regarding the realization of fuzzy prediction of main installations of bulk gas transportation. The results of these algorithms obtained by using the Box – Jenkins fuzzy model are compared with the alternative methods of artificial neural networks and spectral analysis, particularly the analysis of dynamics of spectral components or temporal series.*

**Key words:** Fuzzy-set theory apparatus, fuzzy logic, fuzzy control algorithm, fuzzy prediction, smart sensor, electrically driven gas compressor unit.

### List of References

1. Puzhailo A. F., Spurudovich E. A., Voronkov V. I. Energy saving and automation of the compressor stations electric equipment: Monography / A. F. Puzhailo and others / ed. by D. Sc. O. V. Kriukov. – Nizhny Novgorod: Vector TiS, 2010. – 560 p.
2. Kriukov O. V., Stepanov S. E. Improving stability of electric drive operation within the centrifugal blowers on the ‘Gazprom’ JSC compressor stations // Gas industry. – 2014. – № 8 (710). – P. 50 – 56.
3. Kriukov O. V. Strategies of non-variant systems of electric drives control at the ‘Gazprom’ JSC facilities // Identification of systems and SICPRO’15 control task: Collection. – M. : V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences. – 2015. – P. 368 – 386.
4. Serebriakov A. V., Kriukov O. V., Vasenin A. B. Fuzzy models and algorithms of control of the wind-energy installations // Conference proceedings ‘Control processes within technical, ergatic, organizational and network systems’ / ed. by Vasilev S. N. – M. : Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, 2012. – P. 467 – 469.
5. Kriukov O. V., Kiiyanov N. V. Electric equipment and automation of water rotation systems of enterprises with mechanical cooling towers: Monography / Kriukov O. V., Kiiyanov N. V. – Nizhny Novgorod: NSTU, 2007. – 260 p.
6. Zakharov P. A., Kriukov O. V. Methodology of the non-variant control over the compressor station devices during random effects // News of Higher Educational Institutions. Electromechanics. – 2009. – № 5. – P. 64 – 70.
7. Zakharov P. A., Kriukov O. V. The foundations of the non-variant control over the electric drives of the gas-transport systems during random perturbations // Reporter of the Ivanovo State Power University. – 2008. – № 2. – P. 98 – 103.
8. Kriukov O. V. Electric drive systems in compressor stations with stochastic perturbations // Russian Electrical Engineering. – 2013. – V. 84. – P. 135 – 138.
9. Zade L. A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. Part 1, 2, 3 // Information Sciences. – N 8. – P. 199 – 249; 301 – 357; N 9. – P. 43 – 80.

10. Zade L. Definition of the linguistic variable and its application to the approximate solutions // Translated from English by Ringo N. I. / ed. by Moiseev and Orlovskii. – M. : Mir, 1976. – 165 p.
11. Kriukov O. V. Methodology and tools of the neuro-fuzzy systems of predicting the condition of the gas compressor units // Electric engineering. – 2012. – № 9. – P. 52 – 57.
12. Kriukov O. V. Application tasks of the experiment planning theory for the non-variant objects of the gas-transport systems // Studies of the IX International Conference ‘System identification and control tasks’, SICPRO’12 – M. : Institute of Control Sciences. – 2012. – P. 222 – 236.
13. Kriukov O. V., Serebriakov A.V. System of on-line diagnostics of the wind-energy installations’ technical condition // Electric engineering. – 2015. – № 4. – P. 49 – 53.
14. Babichev S. A., Bychkov E. V., Kriukov O. V. Analysis of the technical condition and reliability of electrically driven gas compressor units // Electric engineering. – 2010. – № 9. – P. 30 – 36.
15. Babichev S. A., Zakharov P. A., Kriukov O. V. Automated system of on-line monitoring of drive motors within the gas compressor units // Industrial automation. – 2009. – № 6. – P. 3 – 6.
16. Kriukov O. V., Gorbatushkov A. V., Stepanov S. E. The foundations of constructing the non-variant electric drives of the power sites // Automated electric drive and industrial electronics. Proceedings of the IV National Research-to-Practice conference / under the general editorship of Ostrovlianchik V. Iu. – Novokuznetsk, 2010. – P. 38 – 45.
17. Kiiianov N. V., Kriukov O. V., Pribytkov D. N., Gorbatushkov A. V. Concept for non-variant automated electric drives development intended for the water rotation systems with the mechanical cooling tower // Electric engineering. – 2007. – № 11. – P. 62 – 67.
18. Kriukov O. V. Virtual load sensor of the synchronous machines // Electric equipment: operation and maintenance. – 2014. – № 3. – P. 45 – 50.
19. Kiiianov N. V., Kriukov O. V., Zakharov P. A., Babichev S. A., Sysa A. Iu. The device intended for the linguistic failure diagnostics of the asynchronous electric drive. RF patent for the utility model. – RUS № 91636. – Published 05.10.2009.
20. Kriukov O. V., Vasenin A. B., Serebriakov A. V. Test bed of the electromechanical part within the wind energy device // Drive technology. – 2012. – № 4. – P. 2 – 11.

*Oleg Victorovich Kriukov, Chief Specialist, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.).  
‘Giprogazcentr’ JC (Nizhny Novgorod).  
Tel. (831) 428-25-84, gas. 25-092, e-mail: o.kryukov@ggc.nnov.ru.*