

Применение нечетких деревьев для задач управления газотранспортной системой

А. К. Петрова

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

akpetrova@etu.ru

Р. А. Бурнашев, Р. Р. Фарахов

Институт вычислительной математики и
информационных технологий, Казанский
(Приволжский) федеральный университет

r.burnashev@inbox.ru, rus-wing-dark@mail.ru

Аннотация. Применение интеллектуальных средств для повышения эффективности управления газотранспортной системой является актуальной задачей. В тех случаях, когда трудно разработать простую математическую модель предметной области и требуется высокая гибкость в настройках системы управления, одним из часто используемых инструментов является нечеткая логика. Вместе с тем, когда количество входных параметров к нечеткой системе увеличивается, количество правил увеличивается экспоненциально, что уменьшает вычислительный КПД нечеткой системы. Чтобы преодолеть эту проблему, рассматривается возможность реализации нечеткой системы вывода FIS не как одного монолитного объекта, а как соединение небольших нечетких объектов в дерево. Описанию результатов такого применения посвящена данная статья

Ключевые слова: нечеткие деревья, газотранспортная система, баланс, аномалии, управление, эффективность

I. ВВЕДЕНИЕ

Для эффективной работы системы транспорта газа необходимо, чтобы физические потери газа, вследствие различных причин, в стоимостном выражении, стремились к нулю [1–4]. Целью решения задачи управления балансом газа является определение, с учетом технологических ограничений, режима работы сети магистрального газопровода, обеспечивающего требуемое значение критерия управления и удовлетворяющего заданным граничным условиям на входах и выходах сети.

В статье [5] для разработки алгоритма управления балансом исследуется применение дискретного автомата. Однако, ввиду нелинейности входных факторов, а также, поскольку простая математическая модель предметной области является трудно формализуемой, при этом требуется высокая гибкость в настройках системы управления, целесообразно рассмотреть вариант применения модели автомата в сочетании с нечеткой логикой, то есть нечеткого автомата.

II. ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКИХ ДЕРЕВЬЕВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ БАЛАНСОМ

Для идентификации отклонений параметров расхода газа и выявления небаланса в ГТС анализируются отклонения значений технологического процесса учета расхода газа от заданных по следующим параметрам:

1. отклонения значений параметров учета расхода газа от значений, предсказанных при помощи LSTM-нейронных сетей;
2. длительность этих отклонений во времени;
3. скорость нарастания отклонений.

Каждый из этих параметров оценивается по трем уровням значений, «большое», «среднее», «маленькое». В зависимости от их сочетаний, определяется «большой», «средний» или «маленький» небаланс, то есть для формализации нечетких отношений данного набора из трех входных и одной выходной переменных потребуется 27 правил.

При увеличении количества входных параметров в нечеткой системе, количество правил увеличивается экспоненциально, что уменьшает вычислительный КПД нечеткой системы, делает ее результаты более трудной для интерпретаций, а настройку правил и параметров функций принадлежности более трудоёмкой.

Чтобы преодолеть эту проблему, можно реализовать нечеткую систему вывода не как один монолитный объект, а соединяя ее части в деревья. Такие нечеткие деревья также известны как иерархические нечеткие системы, поскольку выглядят как иерархические древовидные структуры. В древовидной структуре выходные параметры низкоуровневых нечетких систем используются в качестве входных параметров высокоуровневых нечетких система. Части нечеткое дерево в вычислительном отношении более эффективно и легче интерпретируемо, так содержат меньшее количество правил.

Для создания иерархической структуры, нечеткая модель управления балансом может быть разделена на 2 части, каждая из которых принимает на вход 2 параметра, и выводит один. Входными параметрами первой нечеткой модели являются величина и длительность отклонения, выходным – вспомогательная переменная, «предварительный небаланс». Входными параметрами второй нечеткой модели являются предварительный небаланс и скорость нарастания отклонения, выходным – итоговая переменная, «небаланс».

Нечеткие правила для обеих моделей иллюстрируют табл. 1 и 2.

ТАБЛИЦА I. Нечеткие правила для первой нечеткой модели

Предварительный небаланс	Отклонение	Длительность отклонения
Большой	Большое	Низкая / Средняя / Большая
	Низкое / Среднее / Большое	Большая
Средний	Среднее	Низкая / Средняя
	Низкое / Среднее	Средняя
Низкий	Низкое	Низкая

ТАБЛИЦА II. Нечеткие правила для второй нечеткой модели

Уровень небаланса	Предварительный небаланс	Скорость нарастания отклонения
Большой	Большой	Низкая / Средняя / Большая
	Низкий / Средний / Большой	Большая
Средний	Среднее	Низкая / Средняя
	Низкий / Средний	Средняя
Низкий	Низкий	Низкая

Нечеткую иерархическую структуру, состоящую из двух частей, иллюстрирует рис. 1.

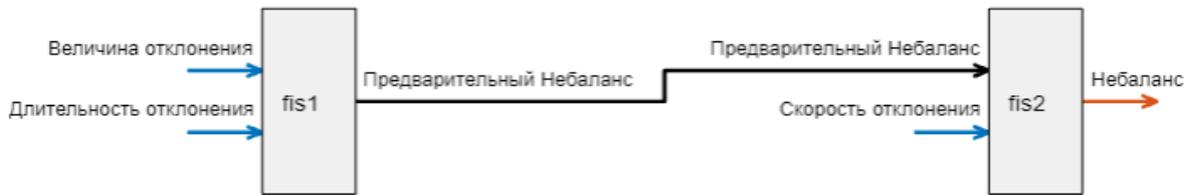


Рис. 1. Нечеткая иерархическая структура

С использованием среды Matlab [6–9], к статистическим данным по расходу газа были применены различные методы построения нечеткой системы. Набор данных разделен на обучающую и тестовую выборку в пропорции 70 % и 30 % исходного набора данных соответственно.

Сравнения осуществлялось по следующим параметрам:

- Тип модели (Мамдани, Сугено и др.); в модели Мамдани более интуитивная, интерпретируемая база правил, модель Сугено обладает вычислительной эффективностью, подходит для математического анализа)
- Функции принадлежности для осуществления фазификации: количество функций для каждого входного и выходного параметра, вид (треугольная, трапециевидная, простая кривая Гаусса, двусторонняя композиция кривых Гаусса и др.); параметры этих функций;
- Метод агрегирования нечетких продуктов (определение степени истинности условий по каждому из правил системы нечеткого вывода);
- Метод обучения нечеткой модели на статистических данных (обратного распространения ошибки или гибридный, в сочетании с алгоритмом наименьших квадратов);
- Метод оптимизации параметров: генетические алгоритмы, нейроадаптивный подход и др.
- Метод дефазификации (метод центра тяжести; метод центра площади; метод левого модального значения; метод правого модального значения).

Для данной задачи выбрана модель типа Мамдани, поскольку она обладает более интерпретируемой базой

правил. Структуры частей нечеткого дерева иллюстрируют рис. 1 и 2.

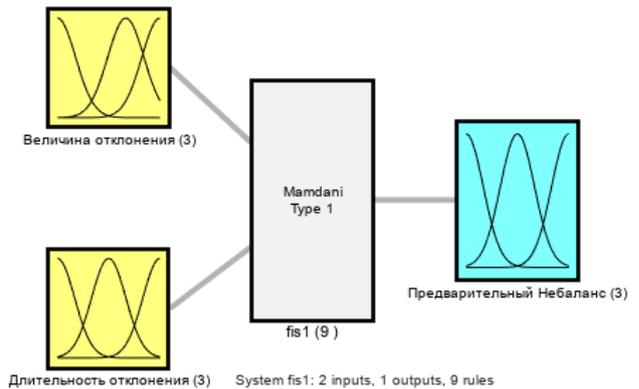


Рис. 2. Модель первой части иерархической нечеткой системы

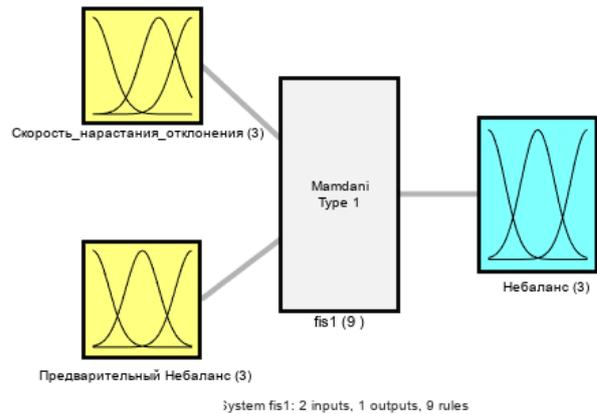


Рис. 3. Модель второй части иерархической нечеткой системы

Структура и правила модели были зафиксированы и следующим этапом в среде Matlab были подобраны другие параметры нечеткой модели. Таблица 3

иллюстрирует сравнение результатов применения методов. Критерием сравнения является среднеквадратическая ошибка предсказаний RMSE (Root Mean Square Error), которая вычисляется по формуле:

$$MSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}$$

где y_i – значение тестовой выборки, \hat{y}_i – значение, предсказанное нечеткой моделью, n – количество сравниваемых значений, $i \in [1, n]$.

ТАБЛИЦА III. РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНЕНИЯ МЕТОДОВ

Методы оптимизации	RMSE
Функции принадлежности	
Треугольная	0.978
Трапецидальная	0.856
Простая кривая Гаусса (Гауссиана)	0.689
Двусторонняя кривая Гаусса	0.728
Колоколообразная	
Метод агрегирования нечетких продуктов	
Мах-оператор	0.613
Средневзвешенный арифметический оператор	0.723
Методы обучения	
Гибридный	0.596
Обратного распространения	0.688
Методы оптимизации	
Нейроадаптивный подход	0.593
Генетические алгоритмы	0.557
Метод дефаззификации	
Метод центра тяжести	0.511
Метод центра площади	0.548
Метод левого модального значения $y = x \min$	0.526
Метод правого модального значения $y = x \max$	0.539

Наилучшей по точности оказалась нечеткая модель следующего вида: тип Мамдани, 9 правил, функции принадлежности – Гауссиана и двусторонняя Гауссиана, метод агрегации правил – нахождение максимума, метод дефаззификации – центроид. Модель обучена в среде Матлаб гибридным методом, с применением оптимизации на основе генетических алгоритмов, за 50 эпох.

Функцией принадлежности, обеспечившей минимальную ошибку, оказалась набор Гауссиан, параметры которых приводит табл. 4.

ТАБЛИЦА IV. ПАРАМЕТРЫ ФУНКЦИЙ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

Название величины	Характеристики			
	Диапазон	Количество	Тип	Параметры
Величина отклонения	0:100	3	Gaussian	[10.62 17]
			Two-sided Gaussian	[6.48 35.12 6 40.88]
			Gaussian	[17.0874 62.0058]
Длительность отклонения	0:3	3	Gaussian	[0.5309 0]
			Gaussian	[0.5311 1.5]
			Gaussian	[0.5311 3]
Предварительный небаланс	0:3	3	Gaussian	[0.2 0]
			Gaussian	[0.2 0.5]
			Gaussian	[0.5 3]
Скорость нарастания отклонения	0:3	3	Gaussian	[0.3537 -1]
			Gaussian	[0.3539 0]
			Gaussian	[0.3539 1]
Небаланс	0.3	3	Gaussian	[0.2 0]
			Gaussian	[0.2 0.5]
			Gaussian	[0.5 3]

Графики поверхностей вывода для обеих частей системы иллюстрируют рис. 4, 5.

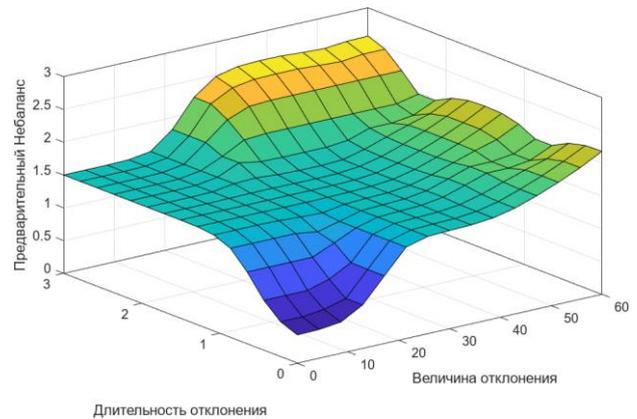


Рис. 4. Поверхность вывода первой части иерархической системы

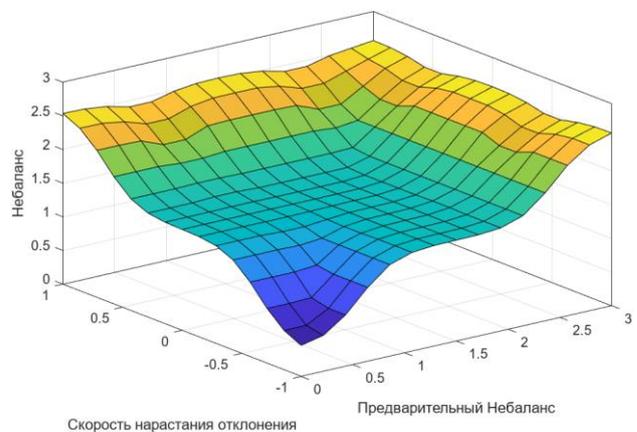


Рис. 5. Поверхность вывода второй части иерархической системы

Следующим шагом осуществлено тестирование обученной модели на тестовой выборке. График результатов тестирования иллюстрирует рис. 6. В верхней части рисунка показаны графики расхода на одной из ГРС Калининградского участка Северо-

Западной газотранспортной сети; в средней части – отклонения, идентифицированные при помощи предсказаний алгоритма машинного обучения; в нижней части – уровень небаланса, результат обученной на предсказаниях и правилах нечеткой модели

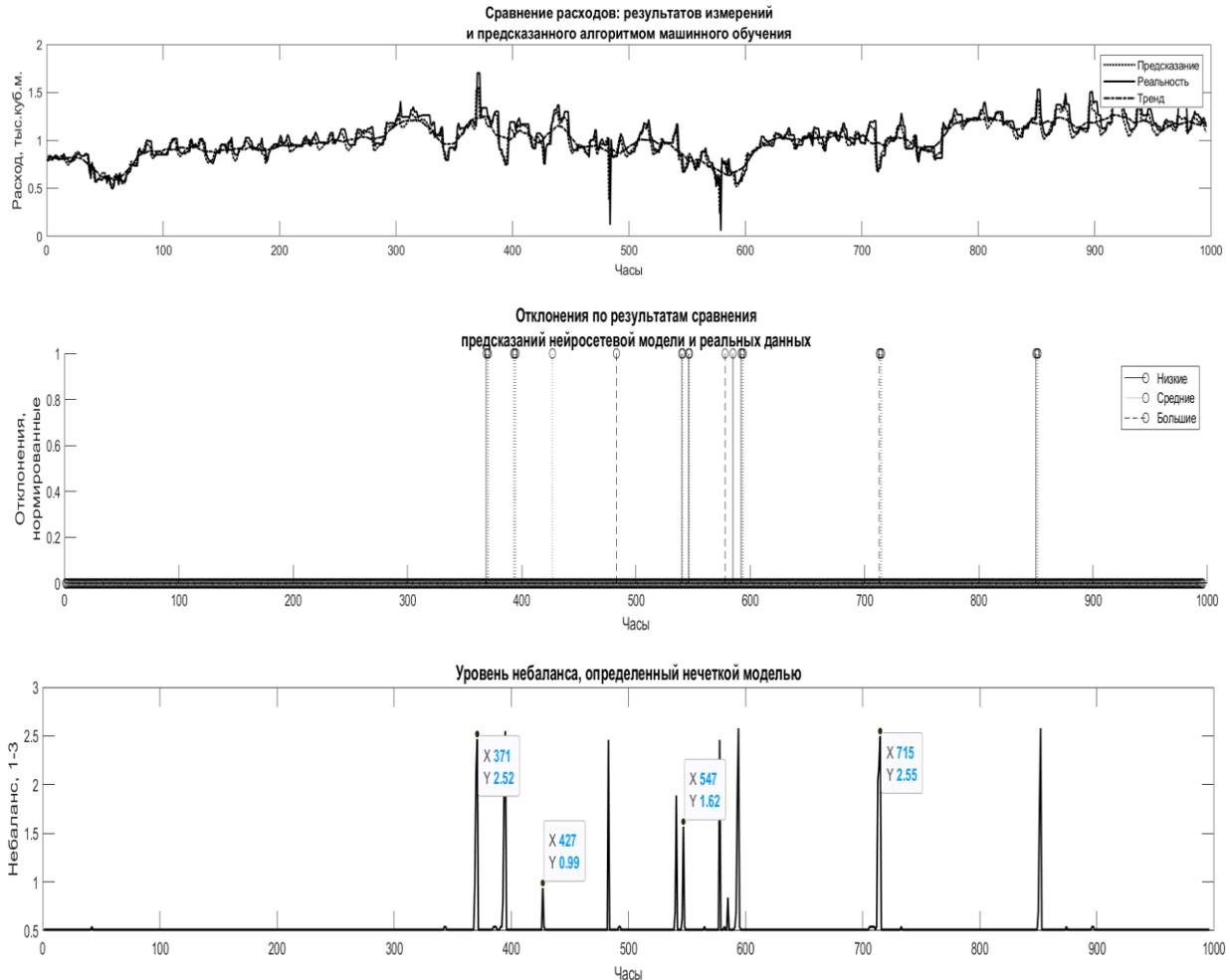


Рис. 6. Результат тестирования обученной нечеткой модели

Рисунки иллюстрируют, что нечеткая модель адекватно отражает присутствующие на верхнем графике отклонения.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассматривается применение нечеткой системы не как одного монолитного объекта, а как соединение небольших нечетких объектов в дерево, для улучшения вычислительной эффективности, повышения ее интерпретируемости и уменьшения трудоёмкости составления правил. Результаты показывают адекватность определения небаланса иерархической нечеткой моделью, что может положительно сказаться на эффективности управления газотранспортной системой в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Игнатьев А.А. Оценка причин разбаланса объемов газа в системе «поставщик – потребитель» // Газовая промышленность. 2010. № 6. С. 20–22.
- [2] Саликов А.Р. Разбаланс в сетях газораспределения // Газ России. 2015. № 4. С. 36–41.
- [3] Хворов Г.А., Козлов С.И., Аكوпова Г.С., Евстифеев А.А. Сокращение потерь природного газа при транспортировке по магистральным газопроводам ОАО «Газпром» // Газовая промышленность. 2013. № 12. С. 66–69.
- [4] Слободчиков К.Ю. Метод формирования расчетных примеров для диспетчерских задач транспорта газа // Газовая Промышленность 2018. 3:78-86
- [5] Петрова А.К. Метод синтеза алгоритма управления балансом газа в региональной газотранспортной системе // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023, №16.
- [6] Дьяконов В.П., Круглов В.В. MATLAB 6.5 SP1/7/7 SP1/7 SP2 + Simulink 5/6. Инструменты искусственного интеллекта и биоинформации. М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2006.
- [7] Ярушкина П.Л. Основы теории нечетких и гибридных систем: учеб. пособие. Москва: Финансы и статистика, 2009. 320 с.
- [8] Дилигенский Н.В., Дымова Л.Г., Севастьянов П.В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в условиях неопределенности: технология, экономика, экология. М.: «Издательство Машиностроение – 1», 2004.
- [9] Сайт Mathwork (Matlab) [Электронный ресурс] Режим доступа: / <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/design-fuzzy-logic-controller-for-artificial-pancreas.html> / (дата обращения 15.02.2024