

УДК 004.891.3

Сравнительный анализ методов моделирования серверной нагрузки

Пешков Дмитрий Витальевич^(*)peshkov@bmstu.ru
SPIN-код: 1078-5202

Гуренко Владимир Викторович

wgurenko@bmstu.ru
SPIN-код: 2675-4796

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Представлена разработка и сравнительный анализ трех подходов к моделированию серверной нагрузки: нечеткая логическая система, основанная на экспертных знаниях и моделирующая процесс принятия решений; множественная линейная регрессия и нейронная сеть. Экспериментальные результаты демонстрируют преимущество нечеткого моделирования. Полученные результаты имеют практическую значимость для разработки гибридных систем управления в реальном времени для различных областей машиностроения.

Ключевые слова: математическое моделирование, прогнозирование нагрузки, нечеткие системы, нейронные сети, регрессионный анализ, гибридные методы, адаптивное управление

Comparative analysis of server load modeling methods

Peshkov Dmitriy Vital'yevich^(*)peshkov@bmstu.ru
SPIN-code: 1078-5202

Gurenko Vladimir Viktorovich

wgurenko@bmstu.ru
SPIN-code: 2675-4796

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. This paper presents the development and comparative analysis of three approaches to server load modeling: a fuzzy logic system based on expert knowledge that models the decision-making process; multiple linear regression; and a neural network. Experimental results demonstrate the advantage of fuzzy modeling. The obtained findings have practical significance for the development of real-time hybrid control systems in various fields of mechanical engineering.

Keywords: mathematical modeling, load forecasting, fuzzy systems, neural networks, regression analysis, hybrid methods, adaptive control

Введение. Цифровая трансформация современного машиностроения предполагает широкое внедрение интеллектуальных систем управления технологическими процессами. Одной из ключевых задач является эффективное распределение вычислительных ресурсов для обработки изменяющихся нагрузок в реальном времени. Традиционные детерминированные модели часто оказываются недостаточно гибкими для работы в условиях неопределенности и изменчивости входных параметров [1].

В последние годы методы нечеткой логики находят все большее применение в задачах управления сложными техническими системами. Их преимущество заключается в способности работать с неточными данными и принимать решения на основе экспертных знаний, формализованных в виде лингвистических правил [2, 3].

В данной работе исследуется применение аппарата нечеткой логики для моделирования запросов к серверам с учетом временных факторов — времени суток и дней недели. Разработанная модель сравнивается с линейной регрессией и нейронной сетью-перцептроном.

Материалы и методы. Для проведения исследования был разработан комплекс программных моделей на языке Python с использованием специализированных библиотек научных вычислений (NumPy, Pandas, Scikit-learn, Scikit-fuzzy). Генерация синтетических данных выполнялась с учетом реальных закономерностей изменения нагрузки на серверные системы. Были смоделированы два основных фактора влияния: время суток (с выделением утреннего, дневного, вечернего и ночного периодов) и день недели (с разделением на понедельник, пятницу, остальные рабочие дни и выходные) (рис. 1). Общий объем синтезированных данных составил 1000 образцов, покрывающих все сочетания временных факторов.

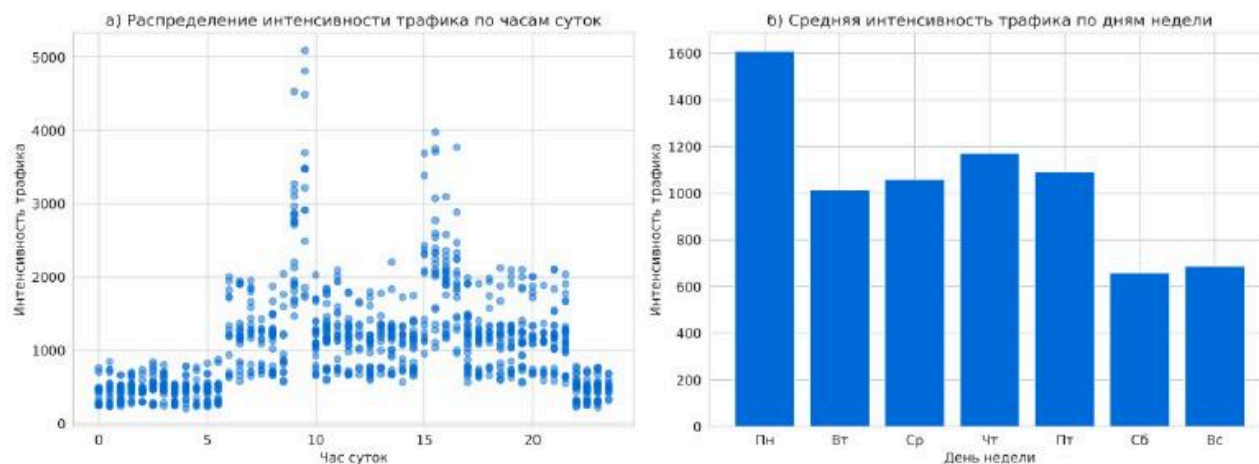


Рис. 1. Распределение интенсивности трафика:

а — по часам суток; б — по дням недели основой предлагаемого подхода является нечеткая логическая система, включающая три входные переменные и одну выходную

Входные переменные представлены: часом суток, днем недели и интенсивностью запросов. Выходная переменная характеризует коэффициент умножения интенсивности обработки запросов. Для каждой переменной определены соответствующие функции принадлежности, формализующие лингвистические понятия.

База правил системы состоит из 25-ти продукционных правил, комбинирующих различные состояния входных переменных. Для сравнения эффективности разработанной нечеткой системы были реализованы два альтернативных подхода: множественная линейная регрессия и многослойный перцептрон.

Результаты. Проведенные вычислительные эксперименты позволили получить сравнительные характеристики трех моделей нагрузки. Оценка качества моделирования выполнялась с использованием метрик среднеквадратичной ошибки (MSE) и коэффициента детерминации. Также анализировалось время обучения моделей как важный фактор практической применимости. В таблице представлены результаты сравнительного анализа для каждого из описанных методов.

Результаты экспериментального сравнительного анализа

Критерий	Рассматриваемый метод		
	Линейная регрессия	Нейронная сеть	Нечеткая логика
MSE	0,391	0,215	0,159
	0,219	0,570	0,682
Время обучения	0,000	1,295	2,818

Следует отметить, что нечеткая система не требует обучения в традиционном понимании, а указанное время включает процесс инициализации и тестирования системы. Для проверки согласованности работы системы была построена трехмерная визуализация поверхности принятия решений. Визуализация представлена на рис. 2. В полученной визуализации наблюдаются четко выраженные пики нагрузки в рабочие дни в дневное время и спад в ночные часы и выходные дни, а также плавные переходы, что может свидетельствовать о хорошей сбалансированности системы правил.

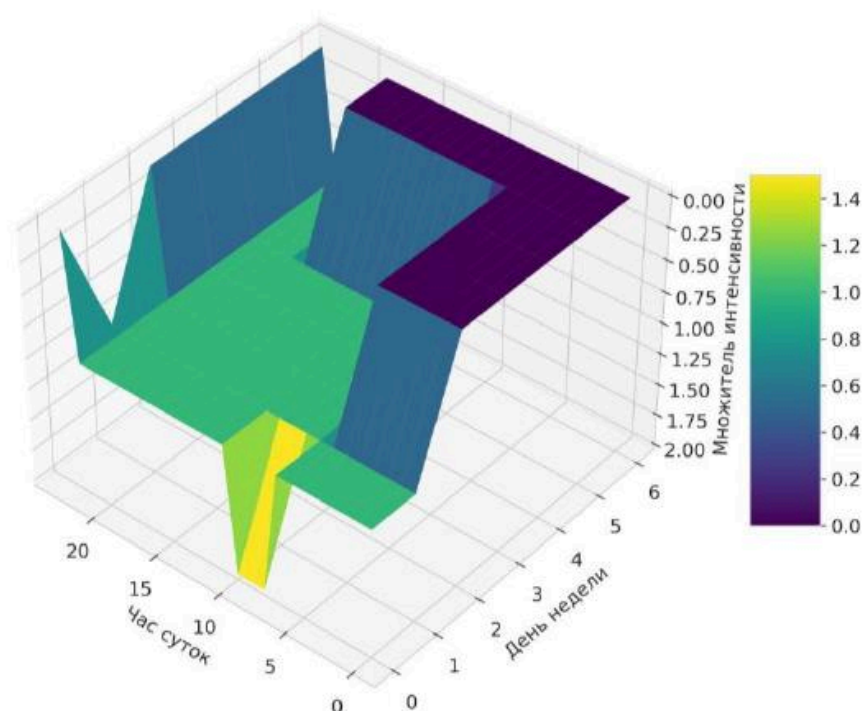


Рис. 2. Поверхность принятия решений нечеткой системы

Обсуждение полученных результатов. Полученные результаты свидетельствуют о практической применимости нечетких логических систем для задач адаптивного управления серверными ресурсами. Нечеткая система продемонстрировала наилучшие показатели точности среди рассматриваемых методов. Наибольшее время работы нечеткой системы объясняется сложностью вычисления функций принадлежности и применения большого количества правил. Однако это время включает полную инициализацию системы, в то время как в реальной эксплуатации система будет работать значительно быстрее [4]. Низкая эффективность линейной регрессии ожидаема, учитывая нелинейный характер зависимости интенсивности трафика от временных факторов. Нейронная сеть показала не самые лучшие результаты, что может быть связано с относительно небольшим объемом обучающих данных и неоптимальной архитектурой сети. В отличие от нечеткой системы, нейронная сеть не рассматривает экспертное знание о природе данных, а полагается исключительно на выявление закономерностей в данных. Авторы допускают, что при использовании более совершенных архитектур нейронных сетей их результаты могут превзойти предложенную модель. В то же время основным преимуществом предложенного подхода авторы считают интерпретируемость. Реализованная нечеткая система позволяет проследить логику принятия решений через понятные человеку правила. Более того, система может быть легко модифицирована путем добавления новых правил на основе экспертных знаний. Предложенный подход может быть успешно применен не только для управления серверными ресурсами, но и в других задачах машиностроения, связанных с адаптивным управлением: регулирование технологических параметров в реальном времени, оптимизация энергопотребления, прогнозирование отказов оборудования.

Для верификации чувствительности нечеткой системы к времени суток рассмотрим пример понедельника (рис. 3).

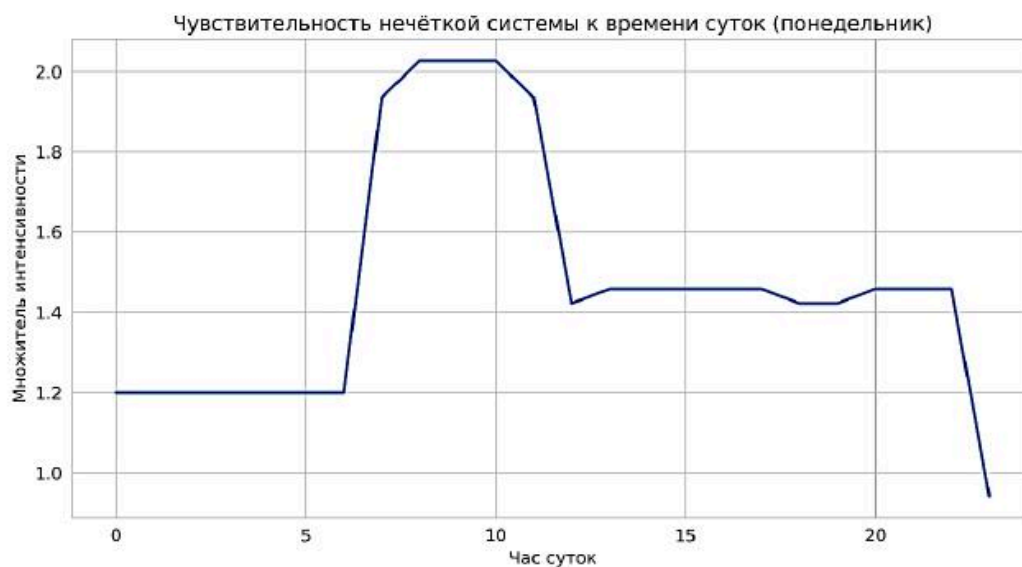


Рис. 3. Анализ чувствительности нечеткой системы к времени суток на примере понедельника

Важным аспектом практического внедрения является возможность интеграции нечеткой системы с существующими системами управления технологическими процессами (АСУ ТП). Благодаря своей концептуальной простоте и низким вычислительным требованиям, система может работать в реальном времени даже на аппаратных платформах с ограниченными ресурсами.

Заключение. В работе продемонстрирована эффективность применения нечеткой логики для задачи адаптивного управления серверными ресурсами. Разработанная система показала наилучшую точность прогнозирования среди сравниваемых методов при значительно более высокой интерпретируемости результатов. Ключевыми преимуществами предложенного подхода являются: прозрачность процесса принятия решений, легкость модификации на основе экспертных знаний, низкие вычислительные требования, возможность работы в условиях неполноты и нечеткости исходных данных.

Полученные результаты имеют практическую значимость для различных областей машиностроения, связанных с управлением сложными технологическими процессами в реальном времени. В перспективе планируется разработка гибридной системы, сочетающей адаптивные возможности нейронных сетей и интерпретируемость нечетких систем, а также апробация подхода на реальных промышленных данных.

Список источников

- [1] Rahman A., Kennedy P., Simmonds A., Edwards J. Fuzzy logic based modelling and analysis of network traffic. *8th IEEE International Conference on Computer and Information Technology*, Sydney, NSW, Australia, 2008, pp. 652–657. <https://doi.org/10.1109/CIT.2008.4594752>
- [2] Apiecionek L. Fuzzy Neural Networks — A Review with Case Study. *Applied Sciences*, 2025, vol. 15, no. 13, art. no. 6980. <https://doi.org/10.3390/app15136980>
- [3] Sakharov M.K., Karpenko A.P. Adaptive load balancing in the modified mind evolutionary computation algorithm. *Supercomputing Frontiers and Innovations*, 2018, vol. 5, no. 4, pp. 5–14. <https://doi.org/10.14529/jsfi180401>
- [4] Викулов Е.О., Денисов О.В., Мещеряков В.А., Денисова Л.А. Имитационное моделирование распределения вычислительной нагрузки между серверными станциями с использованием нечеткого логического вывода. *Автоматизация в промышленности*, 2021, № 9, с. 7–14. <https://doi.org/10.25728/avtprom.2021.09.01>