

<https://doi.org/10.26160/2474-5901-2025-50-70-77>

НЕЧЁТКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА WI-FI СОЕДИНЕНИЯ НА ОСНОВЕ КЛЮЧЕВЫХ ПАРАМЕТРОВ QOS

Хабаров С.П.

*Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет
им. С.М. Кирова, Санкт-Петербург, Россия*

Ключевые слова: нечёткая система Мамдани, функции принадлежности, Wi-Fi, оценка качества соединения (QoS), RSSI, пропускная способность, задержка.

Аннотация. Предложена нечёткая логическая модель типа Мамдани для оценки качества Wi-Fi соединения на основе трёх ключевых параметров: задержки, уровня сигнала и пропускной способности. Используются гладкие функции принадлежности и логически обоснованная база правил, которая реализует принцип «слабого звена» и учитывает критическую роль задержки для интерактивных приложений. Валидация на тестовых сценариях и анализ трёхмерных поверхностей отклика подтверждают корректность, плавность и интерпретируемость работы системы.

FUZZY MODEL FOR WI-FI CONNECTION QUALITY ASSESSMENT BASED ON KEY QOS PARAMETERS

Khabarov S.P.

Saint-Petersburg State Forest Technical University, Saint-Petersburg, Russia

Keywords: Mamdani fuzzy system, membership functions, Wi-Fi, connection quality assessment (QoS), RSSI, throughput, latency.

Abstract. A Mamdani-type fuzzy logic model is proposed for assessing Wi-Fi connection quality based on three key parameters: latency, signal level (RSSI), and throughput. The model employs smooth membership functions and a logically rules base that implements the “weakest link” principle and accounts for the critical role of latency in interactive applications. Validation on test scenarios and analysis of three-dimensional response surfaces confirm the correctness, smoothness, and interpretability of the system’s behavior.

Введение. В условиях повсеместного распространения Wi-Fi сетей обеспечение стабильного и высококачественного соединения становится критически важной задачей. Современные приложения, от онлайн-игр до интернета вещей, предъявляют строгие требования к параметрам качества обслуживания (QoS). Но на практике пользователи и даже специалисты сталкиваются с проблемой, что качество сети оценивается по множеству разных показателей (уровню сигнала, скорости, задержке и т.д.). Из-за этого трудно понять общую картину: нет единой и понятной оценки.

Традиционные подходы ограничиваются либо выводом (в виде полосок) отдельных параметров, либо используют сложные модели [1, 2], непригодные для реального времени. В то же время восприятие качества связи человеком по своей природе нечётко: пользователь не замечает мелких количественных различий, но очень чётко ощущает качественные переходы (например, от «нормы» к «лагам»). Это делает нечёткую логику естественным

инструментом для объединения количественных измерений с качественными суждениями.

В этих условиях актуальными являются исследования по разработке простых, интерпретируемых и практически применимых инструментов мониторинга Wi-Fi, как в клиентских приложениях, так и во встроенных системах диагностики. В этих моделях можно ограничиться только тремя ключевыми и легко измеряемыми параметрами: уровнем сигнала (RSSI), пропускной способностью и задержкой. Они доступны в большинстве операционных систем и соответствуют рекомендациям ITU-T [3].

Постановка задачи. Целью исследования является разработка и валидация нечёткой логической модели Мамдани [4], которая на основе измеренных значений RSSI, скорости и задержки будет формировать агрегированную, интерпретируемую оценку качества соединения в виде лингвистической переменной с термами: “Плохо”, “Удовл.” и “Хорошо”. При этом особое внимание будет уделено обоснованному выбору гладких функций принадлежности (сигмоидальных и гауссовых), а также логически согласованному набору правил вывода, который отражает приоритет критических параметров, таких как высокая задержка.

В качестве инструмента исследования использована среда Octave с пакетом fuzzy-logic-toolkit ввиду её открытости, воспроизводимости и поддержкой систем Мамдани. Скрипты позволили автоматизировать создание переменных, функций принадлежности и правил. Визуализация выполнялась с помощью функций plotmf и gensurf, позволив совместить количественную проверку с качественным анализом поведения модели.

Формирование модели. Предлагаемая нечёткая система включает три входных и одну выходную лингвистические переменные: “RSSI” (уровень сигнала, дБм), отражает стабильность соединения; “Скорость” (пропускная способность, Мбит/с), характеризует производительность; “Задержка” (Latency, мс), определяет реактивность соединения; “Качество” (от 0 до 10), агрегированная оценка состояния Wi-Fi. Каждая переменная описывается тремя лингвистическими термами: “Плохо”, “Удовл.” и “Хорошо”. Такой выбор обусловлен как когнитивными, так и инженерными соображениями.

Согласно психофизиологическим исследованиям, человек может эффективно различать от 3 до 5 качественных категорий. Трёхуровневая шкала является наиболее широко используемой в повседневной практике. С инженерной точки зрения, увеличение числа термов экспоненциально наращивает объём базы правил (при 3 входах и 5 термах до 125 комбинаций), что делает систему чрезмерно избыточной для задачи агрегированной оценки. Трёхзначная шкала обеспечивает оптимальный компромисс между адекватностью, простотой и интерпретируемостью.

Для представления термов были использованы гладкие функции принадлежности, отражающие семантику каждого состояния (рис. 1).

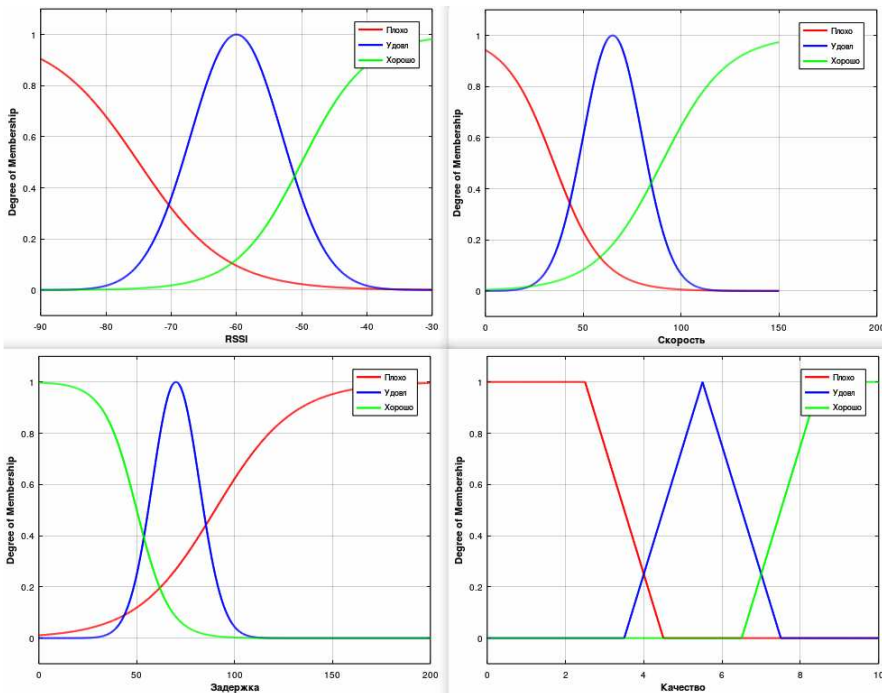


Рис. 1. Функции принадлежности лингвистических переменных

Для крайних термов используются сигмоидальные функции, они обеспечивают монотонный переход. Например, для RSSI терм «Плохо» представлен убывающей сигмоидой (центр в -75 дБм), а терм «Хорошо» возрастающей (центр в -50 дБм). Промежуточный терм представлен гауссовой функцией с центром в характерной для практики точке: -60 дБм (RSSI), 65 Мбит/с (Скорость) и 70 мс (Задержка). Гауссова форма корректно отражает симметричную неопределённость: максимальную степень уверенности в центре и плавное её снижение при отклонении от центра. Выходная переменная «Качество» описана трапецевидными и треугольной функциями, что обеспечивает чёткое разграничение уровней при сохранении перекрытий, необходимых для дефаззификации.

Перекрытие функций принадлежности гарантирует плавность вывода и одновременную активацию нескольких правил в переходных зонах. Например, при $\text{RSSI} = -65$ дБм активны все термы. Таким образом, архитектура модели сочетает физически обоснованные параметры, психологически адекватную градацию и вычислительную эффективность, что делает её пригодной для практического применения.

Описание базы правил нечёткой системы. База правил вывода реализована в виде 15 логических конструкций типа «ЕСЛИ – ТО», которые сформированы на основе экспертных знаний о приоритетах и взаимовлиянии параметров качества соединения. Правила построены так, чтобы обеспечить адекватную и интуитивно понятную оценку, которая отражает реальное восприятие пользователем состояния связи (рис. 2).

```

Командное окно
>> showrule(fis)
1. If (RSSI is Плохо), then (Качество is Плохо) (1)
2. If (Скорость is Плохо), then (Качество is Плохо) (1)
3. If (Задержка is Плохо), then (Качество is Плохо) (1)
4. If (RSSI is Хорошо) and (Скорость is Хорошо) and (Задержка is Хорошо), then (Качество is Хорошо) (1)
5. If (RSSI is Удовл) and (Скорость is Удовл) and (Задержка is Удовл), then (Качество is Удовл) (1)
6. If (RSSI is Хорошо) and (Скорость is Хорошо) and (Задержка is Удовл), then (Качество is Хорошо) (1)
7. If (RSSI is Хорошо) and (Скорость is Удовл) and (Задержка is Хорошо), then (Качество is Хорошо) (1)
8. If (RSSI is Удовл) and (Скорость is Хорошо) and (Задержка is Хорошо), then (Качество is Хорошо) (1)
9. If (RSSI is Хорошо) and (Скорость is Удовл) and (Задержка is Удовл), then (Качество is Удовл) (1)
10. If (RSSI is Удовл) and (Скорость is Хорошо) and (Задержка is Удовл), then (Качество is Удовл) (1)
11. If (RSSI is Удовл) and (Скорость is Удовл) and (Задержка is Хорошо), then (Качество is Удовл) (1)
12. If (RSSI is Хорошо) and (Скорость is Хорошо) and (Задержка is Плохо), then (Качество is Плохо) (1)
13. If (RSSI is Плохо) and (Скорость is Плохо) and (Задержка is Хорошо), then (Качество is Плохо) (1)
14. If (RSSI is Плохо) and (Скорость is Хорошо) and (Задержка is Плохо), then (Качество is Плохо) (1)
15. If (RSSI is Хорошо) and (Скорость is Плохо) and (Задержка is Плохо), then (Качество is Плохо) (1)

```

Рис. 2. Список правил нечёткой системы

Вес всех правил равен 1, что означает их равную значимость. Связь между условиями описывается логическим И (AND) в соответствии со стандартом Мамдани. Выходные термы соответствуют трём градациям качества, определённым ранее. Выделено пять логических группы правил.

- Правила критического влияния (правила 1-3) реализуют принцип «слабого звена»: если хотя бы один из параметров находится в состоянии “Плохо”, то итоговая оценка «Плохо», независимо от остальных. Это отражает практическую реальность. Например, высокая задержка делает невозможным использование VoIP или онлайн-игр, даже при отличном сигнале и высокой скорости. Этот подход гарантирует, что система будет чувствительна к критическим нарушениям и не даст завышенную оценку при наличии хоть одного существенного дефекта.

- Идеальный сценарий (правило 4). Если все параметры находятся в состоянии “Хорошо”, то система выдаст “Хорошо”, что соответствует случаю стабильного, быстрого и отзывчивого соединения.

- Усреднённый сценарий (правило 5). Если параметры находятся в состоянии “Удовл.”, то итоговая оценка будет такая же. Отражает работу системы без запаса прочности. Например, при слабом сигнале, средней скорости и умеренной задержке.

- Смешанные сценарии без критических нарушений (правила 6-11). Если два “Хорошо” и один “Удовл.”, то система выдаст “Хорошо”, что соответствует практике: наличие двух сильных параметров компенсирует одно небольшое отклонение. Если два “Удовл.” и один “Хорошо”, то будет “Удовл.”, что дает системе возможность выдавать умеренную и справедливую оценку, не переоценивая частичное улучшение.

- Сценарии с одним “Плохо” и двумя другими (правила 12-15). Это усиление принципа «слабого звена». Разница между правилами 1-3 и 12-15 заключается не в логическом результате, а в структуре условий и цели покрытия всех возможных комбинаций.

Таким образом, база правил является логически согласованной, не содержит противоречий и охватывает ключевые практические ситуации. Она обеспечивает высокую чувствительность к нарушениям, плавность переходов между уровнями качества и сохраняет интерпретируемость за счёт

минимального набора термов. Это позволяет системе выдавать обоснованные, предсказуемые и полезные для пользователя оценки.

Валидация модели. Для оценки корректности и практической применимости разработанной системы была проведена её валидация на наборе из десяти тестовых сценариев, которые охватывают типичные, пограничные и критические условия эксплуатации Wi-Fi соединения. Сценарии были подобраны для проверки чувствительности к «слабому звену», способности к компенсации, устойчивости в переходных зонах и адекватности при экстремальных значениях параметров. Результаты приведены на рисунке 3, где каждая строка соответствует одному сценарию, а столбцы — входным параметрам и итоговой оценке качества.

```

Командное окно
=== Результаты оценки качества Wi-Fi (гладкие ФП) ===
Тест 1: RSSI= -80, Скорость=100, Задержка=200 --> Качество = 1.77 (Плохо)
Тест 2: RSSI= -85, Скорость= 5, Задержка=150 --> Качество = 1.79 (Плохо)
Тест 3: RSSI= -40, Скорость=120, Задержка= 10 --> Качество = 8.44 (Хорошо)
Тест 4: RSSI= -60, Скорость= 50, Задержка= 80 --> Качество = 4.15 (Удовлетворительно)
Тест 5: RSSI= -50, Скорость= 90, Задержка= 30 --> Качество = 7.04 (Хорошо)
Тест 6: RSSI= -70, Скорость= 25, Задержка=100 --> Качество = 2.14 (Плохо)
Тест 7: RSSI= -45, Скорость=110, Задержка=120 --> Качество = 1.85 (Плохо)
Тест 8: RSSI= -55, Скорость= 70, Задержка= 60 --> Качество = 5.35 (Удовлетворительно)
Тест 9: RSSI= -50, Скорость= 90, Задержка= 89 --> Качество = 4.34 (Удовлетворительно)
Тест 10: RSSI= -50, Скорость= 90, Задержка= 91 --> Качество = 3.93 (Удовлетворительно)

```

Рис. 3. Результаты теста модели на эмпирическом наборе данных

Анализ результатов показывает, что модель корректно реагирует на все ключевые сценарии. В тестах 1, 2, 6 и 7, где хотя бы один параметр находится в критическом состоянии, система выдаёт низкую оценку качества (1.77-2.14), соответствуя заложенному в правила принципу «слабого звена». Особенно показателен тест 7: несмотря на отличные значения RSSI (–45 дБм) и скорости (110 Мбит/с), высокая задержка (120 мс) приводит к оценке «Плохо», что подтверждает настройку приоритетов и адекватность модели для оценки интерактивных приложений.

В идеальном сценарии (тест 3) система выдаёт высокую оценку 8.44, что соответствует ожиданиям. Смешанные положительные сценарии (тест 5) также получают оценку «Хорошо» (7.04), что демонстрирует способность модели учитывать компенсацию параметров.

Особое внимание заслуживают пограничные сценарии (тесты 9-10), в которых задержка изменяется всего на 2 мс (с 89 до 91 мс), то есть пересекает пороговое значение 90 мс. При этом оценка качества плавно снижается с 4.34 до 3.93, но остается в категории «Удовл.», подтверждая эффективность использования сигмоидальных функций и отсутствие скачков, характерных для жёстких пороговых моделей. Такое поведение соответствует реальному восприятию качества: пользователь не ощущает резкого ухудшения при переходе через порог, а чувствует постепенное снижение комфорта.

Дополнительным этапом процесса валидации явилась визуализация трёхмерных поверхностей отклика. Эти графики позволяют оценить в многомерном пространстве поведение системы и подтвердить её работу.

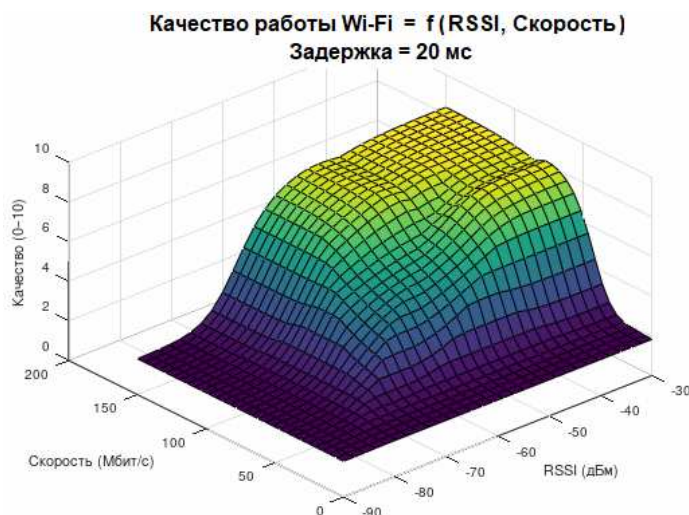


Рис. 4. Зависимость “Качества” от RSSI и “Скорости”

На рисунке 4 видна доминирующая роль RSSI. При слабом сигнале ($\text{RSSI} < -70$ дБм) качество остаётся низким (< 3 баллов) даже при высокой скорости (до 200 Мбит/с), что отражает фундаментальное ограничение беспроводных сетей: без стабильного сигнала невозможно достичь высокой производительности. При улучшении сигнала ($\text{RSSI} > -50$ дБм) и высокой скорости (> 100 Мбит/с) качество достигает максимальных значений (8-10), что соответствует идеальной ситуации. Поверхность имеет пологий склон, что указывает на стабильность и устойчивость оценки в зоне высокого качества. Особо показательно поведение системы в переходной зоне (при $\text{RSSI} = -60$ дБм и Скорости = 50-100 Мбит/с). Здесь виден плавный подъём качества от 4 до 7 (“Удовл.”), который свидетельствует о том, что модель не переоценивает улучшение, а выдаёт сбалансированный результат, учитывающий состояние обоих параметров.

Анализ рисунка 5 подтверждает доминирующую роль уровня сигнала в формировании агрегированной оценки качества Wi-Fi. При слабом сигнале ($\text{RSSI} = -80$ дБм), система демонстрирует жесткое ограничение: максимальная оценка не превышает 2.1 балла, независимо от высокой скорости или низкой задержки. Это физически обоснованно, так как без стабильного канала передачи данных невозможно достичь высокого качества, что соответствует принципу «без сигнала нет связи».

В противоположность этому, при сигнале $\text{RSSI} = -40$ дБм, модель раскрывает свой потенциал: качество может достигать максимума (10 баллов) при одновременном выполнении двух условий — высокой скорости (> 100 Мбит/с) и низкой задержки (< 50 мс). Критическая чувствительность к задержке проявляется ярко: даже при идеальном сигнале и скорости, рост задержки свыше 90 мс вызывает резкое падение оценки до 6-7 баллов, что подчеркивает её первостепенную важность для интерактивных приложений. Таким образом, моделирование в двух крайних сценариях подтверждает

корректность архитектуры: RSSI задаёт верхнюю границу возможного качества, а остальные параметры определяют, насколько близко к этой границе можно подняться.

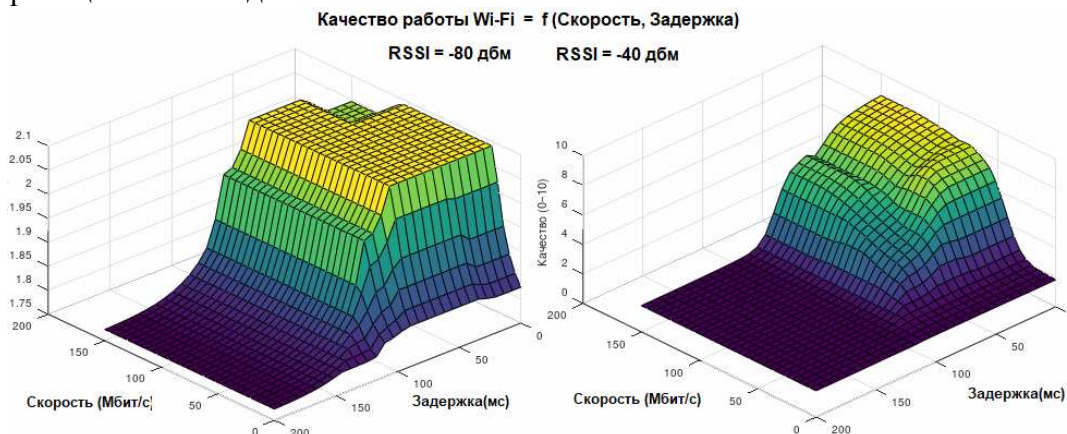


Рис. 5. Зависимость “Качества” от “Скорости” и “Задержки”

Заключение. Предложенная нечеткая модель обеспечивает простую, интерпретируемую и логически обоснованную оценку качества Wi-Fi соединения на основе трёх ключевых параметров: уровня сигнала, пропускной способности и задержки. Валидация на синтетических сценариях и визуальный анализ поверхностей отклика подтверждают корректность её поведения: система адекватно реагирует на критические нарушения, учитывает приоритеты (особенно чувствительность к задержке) и обеспечивает плавный отклик благодаря использованию гладких функций принадлежности.

Вместе с тем, модель имеет ряд ограничений, определяющие рамки её применимости. Она не учитывает такие важные метрики, как джиттер и потеря пакетов, не адаптируется под тип трафика (VoIP, стриминг, игры), основана на экспертных, а не обучаемых правилах. Таким образом, предложенная система наиболее эффективна как легковесный инструмент для первичной диагностики в бытовых и офисных сетях [5], но требует расширения для применения в условиях с жёсткими требованиями к качеству обслуживания.

Список литературы

1. Думов М.И., Хабаров С.П. Моделирование беспроводных сетей в среде OMNeT++ с использованием INET Framework // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2019. – Т. 19, №6. – С. 1151-1161.
2. Думов М.И., Хабаров С.П. Использование OMNET++ для моделирования беспроводных Wi-Fi сетей // Информационные системы и технологии: теория и практика: Сборник научных трудов / Выпуск 10. Часть 1. – СПб.: СПбГЛТУ им. С.М. Кирова, 2018. – С. 44-53.

3. ITU-T Recommendation G.1010. Experience factors involved in multimedia QoS. Geneva: International Telecommunication Union, 2001.
4. Mamdani E.H., Assilian S. An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller // International Journal of Man-Machine Studies. 1975, vol. 7, iss. 1, pp. 1-13.
5. Заяц А.М., Хабаров С.П. Настройка беспроводных соединений в системах мониторинга лесных территорий // Леса России: политика, промышленность, наука, образование / Том 1. – СПб.: СПбГЛТУ им. С.М. Кирова, 2018. – С. 80-83.

References

1. Dumov M.I., Khabarov S.P. Wireless Network Simulation in OMNeT++ Using the INET Framework // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2019, vol. 19, no. 6, pp. 1151-1161.
2. Dumov M.I., Khabarov S.P. Using OMNeT++ for Wi-Fi Wireless Network Simulation. // Information systems and technologies: theory and practice: Collection of scientific papers / Issue 10. Part 1. – SPb.: SPbSFTU n.a. S.M. Kirov, 2018. – P. 44-53.
3. ITU-T Recommendation G.1010. Experience Factors Involved in Multimedia QoS // Geneva: International Telecommunication Union, 2001.
4. Mamdani E.H., Assilian S. An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller // International Journal of Man-Machine Studies. 1975, vol. 7, iss. 1, pp. 1-13.
5. Zayats A.M., Khabarov S.P. Configuration of Wireless Connections in Forest Monitoring Systems // Forests of Russia: Policy, Industry, Science, Education / Vol. 1. – SPb.: SPbSFTU n.a. S.M. Kirov, 2018. – P. 80-83.

Хабаров Сергей Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем и технологий	Khabarov Sergey Petrovich – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of information systems and technologies
Serg.Habarov@mail.ru	

Received 23.10.2025