Алгоритм поиска автомобилей, использующий методы нечеткой логики.

Одним из основных понятий нечеткой логики является понятие лингвистической переменной. В данной работе используются пять лингвистических переменных, которые описывают автомобиль: «Экономичность» (относительно потребления топлива), «Динамика» (относительно времени разгона), «Комфорт», «Безопасность» (относительно поведения в дорожно-транспортных происшествиях) и «Управляемость». Каждая из данных переменных принимает три значения или терма (terms), выраженных на естественном языке. Например, лингвистическая переменная «Динамика» имеет термы: «Низкая динамика», «Средняя динамика», «Высокая динамика». Каждая лингвистическая переменная может рассматриваться в качестве «нечеткого множества» (впервые данный термин был введен в работе [1] Л.А. Заде), а её значения или термы — в качестве «нечетких подмножеств», принадлежащих данному нечеткому множеству.

Нечеткое множество может быть задано с помощью функции принадлежности $\mu(x):X\rightarrow[0;1]$, которая ставит в соответствие каждому элементу $x\in X$ число $\mu(x)$ из интервала $[0;1]$, описывающее степень принадлежности элемента x данному нечеткому множеству.

Рассмотрим нечеткое множество «Экономичность», которое имеет нечеткие подмножества: «Низкий расход», «Средний расход», «Высокий расход».

Для некоторых значений $x\in X$, которые являются значениями среднего расхода топлива в литрах на 100 км, были определены три значения трех функций принадлежности трех нечетких подмножеств (области определения для всех трех функций $D(x) =[0,+\infty)$) путем сбора ответов пользователей веб-приложения на одинаковые по форме вопросы, каждый из которых соответствует одному значению $x\in X$. Например, для значения x = 10 л/ 100 был задан вопрос: «Как Вы думаете, расход топлива в смешанном цикле 10 л/100 км — это», и были предложены три варианта ответа «Низкий расход», «Средний расход», «Высокий расход». На данный вопрос доля ответов пользователей, равная 0.25, приходится на значение «Низкий расход»; доля ответов пользователей, равная 0.32, относится к значению «Средний расход», а доля ответов пользователей, равная 0.43, приходится на значение «Высокий расход». Таким образом, ответы можно представить в виде таблицы 1:

Таблица 1 – Ответы пользователей, выраженные в долях, являющихся значениями трех функций принадлежности $\mu(x)$, каждая из которых соответствует одну подмножеству.

Расход топлива, л/100 км	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Высокий расход	0	0.02	0.11	0.16	0.25	0.43	0.52	0.61	0.71	0.83	0.96
Средний расход	0.02	0.09	0.25	0.36	0.41	0.32	0.27	0.21	0.16	0.11	0.04
Низкий расход	0.98	0.89	0.64	0.48	0.34	0.25	0.21	0.18	0.13	0.06	0

Необходимо отметить, что при $x > 15$, $\mu(x) = 0$ для «Низкого расхода» и «Среднего расхода», а для «Высокого расхода» $\mu(x) = 1$. В то же время при $x < 5$, $\mu(x) = 0$ для «Высокого расхода» и «Среднего расхода», а для «Низкого расхода» $\mu(x) = 1$.

Функции принадлежности $\mu(x)$ можно представить в виде графика (рисунка 1):

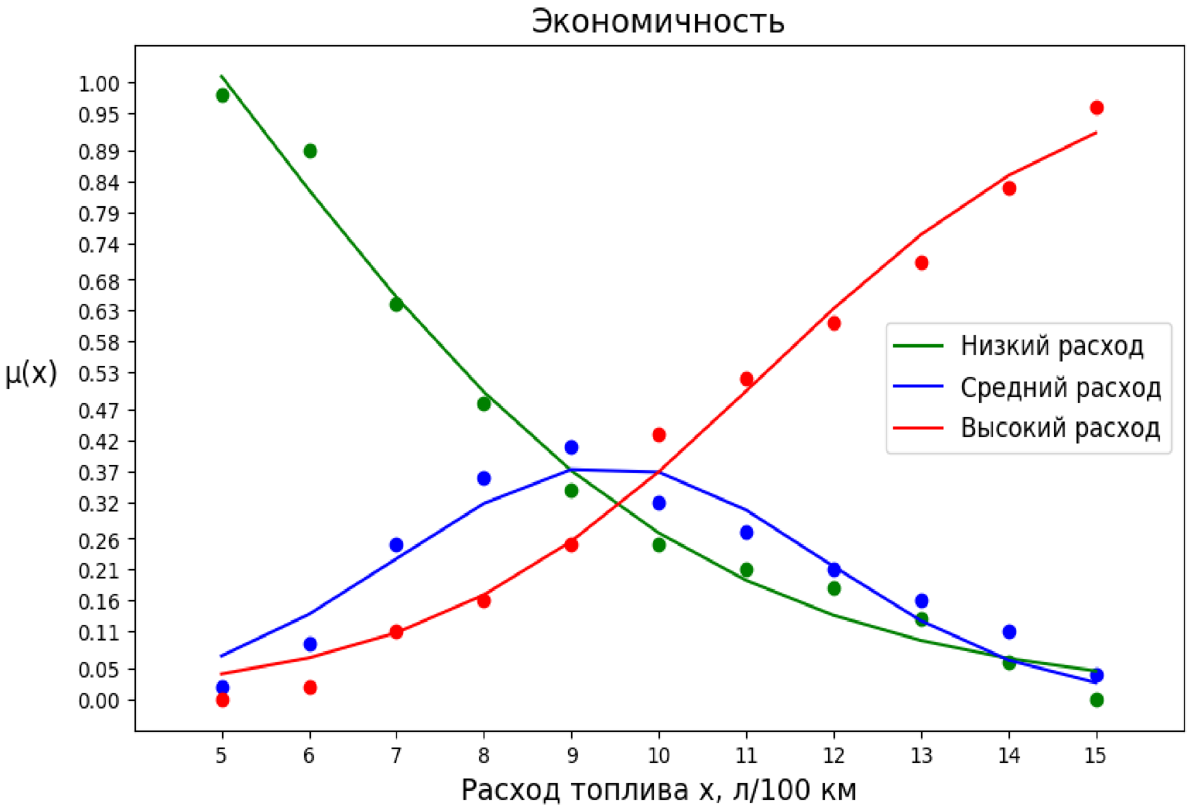

Рисунок 1 – График трех функций принадлежности $\mu(x)$, соответствующих нечетким подмножествам «Низкий расход», «Средний расход» «Высокий расход» нечеткого множества «Экономичность»

Крупные точки данного графика были отмечены согласно данным таблицы 1. Графики функций принадлежности $\mu(x)$ были получены путем аппроксимации данных точек методом Левенберга-Марквардта с помощью пакета «Lmfit» языка программирования «Python».

Для аппроксимации точек, нечетко принадлежащих «Низкому расходу» и «Высокому расходу» была использована функция «Сигмоида» вида:

$$\mu(x) = \frac{L}{1+ e^{-k(x-c)}}, \qquad (1)$$

где x – значение аргумента функции, являющееся абсциссой точек графика, L – максимальное значение, которое может принимать $\mu(x)$, то есть предел $\mu(x)$ при x, стремящимся к бесконечности,

k – параметр «крутизны» кривой. Чем больше k, тем быстрее осуществляется переход от значения 0 к значению L,

c – точка, где функция достигает середины, то есть $\mu(c) = \frac{L}{2}$.

А для аппроксимации точек, нечетко принадлежащих «Среднему расходу» была применена функция Гаусса вида:

$$\mu(x) = \frac{a}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \tag{2}$$

где x – значение аргумента функции, являющееся абсциссой точек графика,

a – коэффициент, задающий масштаб функции. Он влияет на высоту и амплитуду графика, но не на ее форму,

μ – математическое ожидание случайной величины x, показывающее какое значение x является наиболее вероятным,

σ – стандартное отклонение случайной величины x.

Итак, для функции принадлежности, соответствующей «Низкому расходу», были получены параметры L = 1.949834151590793, k = -0.3804532441502327, c = 5.188639378787266, для функции принадлежности, соответствующей «Среднему расходу», были получены параметры a = 2.2900397063026374, μ = 9.43414665796981, σ = 2.4138470099365112, для функции принадлежности, соответствующей «Высокому расходу», были получены параметры L = 1.043723139993038, k = 0.5194913435480255, c = 11.165188013054621.

Аналогично были построены графики функций принадлежности μ(d) (области определения для всех трех функций D(d) =[0,+∞)) для нечетких подмножеств «Низкая динамика», «Средняя динамика», «Высокая динамика» нечеткого множества «Динамика». Значениями области определения являются значения времени разгона автомобиля с 0 км/ч до 100 км/ч в секундах. А пользователям задавались вопросы вида: «Как Вы думаете, время разгона (значение времени разгона, например, 5 секунд) от 0 до 100 км/ч, с — это» для некоторых значений из области определения, и были предложены три варианта ответа «Низкая динамика», «Средняя динамика», «Высокая динамика». Таким образом, ответы можно представить в виде таблицы 2:

Таблица 2 – Ответы пользователей, выраженные в долях, являющихся значениями трех функций принадлежности $\mu(d)$, каждая из которых соответствует одну подмножеству

Время разгона 0-100 км/ч, с	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10
Низкая динамика	0.98	0.97	0.91	0.87	0.81	0.73	0.62	0.44	0.25	0.22	0.18
Средняя динамика	0.02	0.03	0.09	0.13	0.19	0.23	0.3	0.43	0.57	0.51	0.47
Высокая динамика	0	0	0	0	0	0.04	0.08	0.13	0.18	0.27	0.35
Время разгона 0-100 км/ч, с	9	8	7	6	5	4	3				
Низкая динамика	0.14	0.08	0.06	0.05	0.03	0	0				
Средняя динамика	0.42	0.39	0.33	0.23	0.14	0.04	0				
Высокая динамика	0.44	0.53	0.61	0.72	0.83	0.96	1				

Необходимо отметить, что при $d > 20$, $\mu(h) = 0$ для «Высокой динамики» и «Средней динамики», а для «Низкой динамики» $\mu(d) = 1$. В то же время при $d < 3$, $\mu(d) = 0$ для «Низкой динамики» и «Средней динамики», а для «Высокой динамики» $\mu(d) = 1$.

Функции принадлежности $\mu(d)$ можно представить в виде графика (рисунка 2):

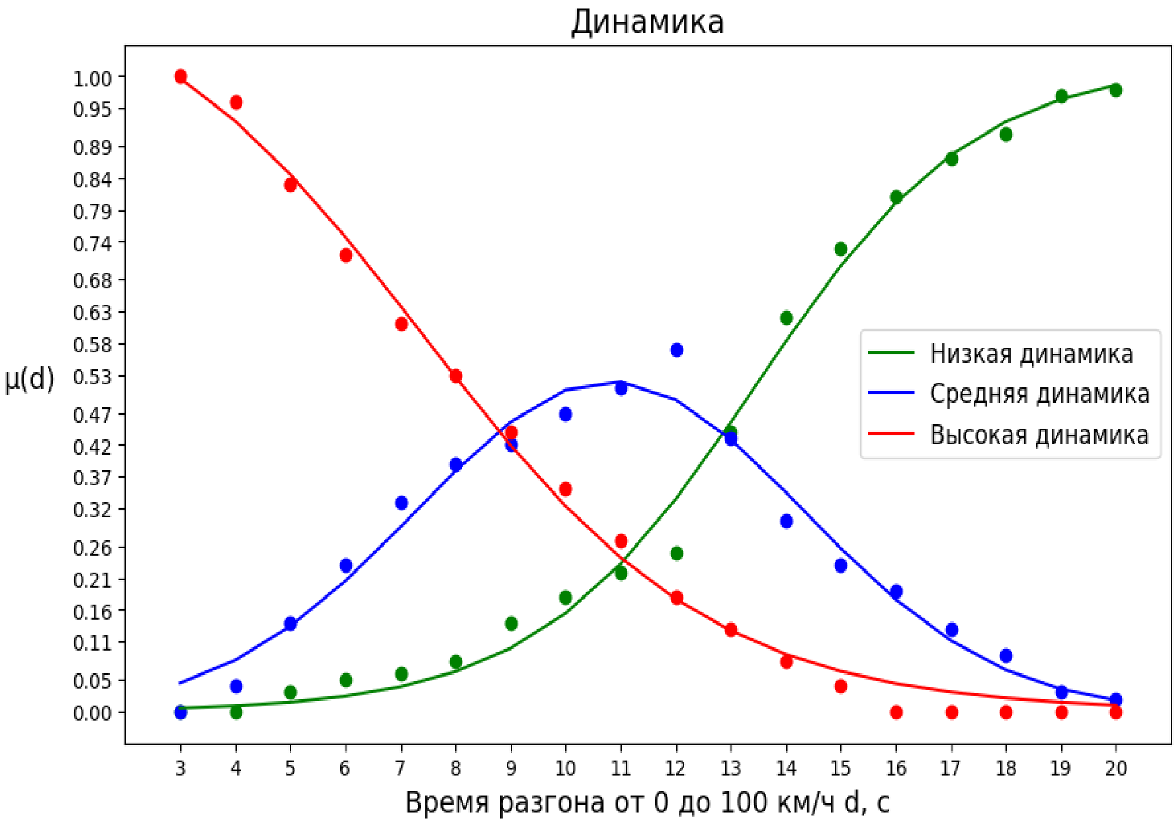

Рисунок 2 – График трех функций принадлежности $\mu(d)$, соответствующих нечетким подмножествам «Низкая динамика», «Средняя динамика» «Высокая динамика» нечеткого множества «Динамика»

Крупные точки данного графика были отмечены согласно данным таблицы 2.

Графики функций принадлежности $\mu(d)$ были получены путем аппроксимации данных точек методом Левенберга-Марквардта с помощью пакета «Lmfit» языка программирования «Python».

Для аппроксимации точек, нечетко принадлежащих «Низкой динамике» и «Высокой динамике» была использована функция «Сигмоида» вида (1), а для аппроксимации точек, нечетко принадлежащих «Средней динамике» была применена функция Гаусса вида (2).

Итак, для функции принадлежности, соответствующей «Низкой динамике», были получены параметры L = 1.0231319819933777, k = 0.5016231903133455, c = 13.44547910618538, для функции принадлежности, соответствующей «Средней динамике», были получены параметры a = 4.59765854168931, μ = 10.810654375352698, σ = 3.529577571232097, для функции принадлежности, соответствующей «Высокой динамике», были получены параметры L = 1.1836613715914706, k = -0.3792245799359442, c = 7.418367289135995.

Также были построены графики функций принадлежности $\mu(h)$ (области определения для всех трех функций $D(h) = [0, +\infty)$) для нечетких подмножеств «Низкая управляемость», «Средняя управляемость», «Высокая управляемость» нечеткого множества «Управляемость». Значениями области определения являются коэффициенты управляемости.

Коэффициент управляемости был рассчитан по формуле:

$$h = |handling + handling * (controlSystemsCoefficient) - sizeCoefficient| \ , \tag{3}$$

где $handling$ – значение управляемости, рассчитанное без учета таких систем контроля движения автомобиля, как ABS, ESP, EBD, BAS, TCS,

$controlSystemsCoefficient$ – коэффициент наличия данных систем,

$sizeCoefficient$ – коэффициент размерности, который позволяет получить более удобные значения коэффициента управляемости . В данном случае $sizeCoefficient = 30$.

Величина $handling$ рассчитывается по формуле:

$$handling = \frac{numerator}{denominator}, \tag{4}$$

где $numerator$ – числитель,

$denominator$ – знаменатель.

Величина $numerator$ рассчитывается по формуле:

$$numerator = power * (efficientFrontTrackWidth + efficietnBackTrackWidth) * 0.5 * driveTypeCoefficient * (frontSuspensionCoefficient * frontStabilizerCoefficient + backSuspensionCoefficient * backStabilizerCoefficient) *, (frontTiresWidth * frontTiresDiameter + backTiresWidth * backTiresDiameter) * (frontBrakesCoefficient + backBrakesCoefficient) \quad (5)$$

где $power$ – мощность двигателя автомобиля в ваттах,

$efficientFrontTrackWidth$ – оптимальная ширина передней колеи в метрах,

$efficietnBackTrackWidth$ – оптимальная ширина передней колеи в метрах,

$driveTypeCoefficient$ – коэффициент типа привода автомобиля,

$frontSuspensionCoefficient$ – коэффициент типа передней подвески,

$frontStabilizerCoefficient$ – коэффициент наличия переднего стабилизатора,

$backStabilizerCoefficient$ – коэффициент типа задней подвески,

$backStabilizerCoefficient$ – коэффициент наличия заднего стабилизатора,

$frontTiresWidth$ – ширина передних шин в метрах,

$frontTiresDiameter$ – диаметр передних шин в метрах,

$backTiresWidth$ – ширина задних шин в метрах,

$backTiresDiameter$ – диаметр задних шин в метрах,

$frontBrakesCoefficient$ – коэффициент типа передних тормозов,

$backBrakesCoefficient$ – коэффициент типа задних тормозов.

Величина $efficientFrontTrackWidth$ рассчитывается по формуле:

$$efficientFrontTrackWidth = frontTrackWidth * 0.5 \frac{|frontTiresWidth - backTiresWidth|}{frontTiresAspectRatio}, \quad (6)$$

где $frontTrackWidth$ – ширина передней колеи в метрах,

$frontTiresAspectRatio$ – процентное соотношение высоты профиля передних шин к их ширине.

Величина $efficientBackTrackWidth$ рассчитывается по формуле:

$$efficientBackTrackWidth = backTrackWidth * 0.5 \frac{|backTiresWidth - frontTiresWidth|}{backTiresAspectRatio}, \quad (7)$$

где $backTrackWidth$ – ширина задней колеи в метрах,

$backTiresAspectRatio$ – процентное соотношение высоты профиля задних шин к их ширине.

Коэффициент $driveTypeCoefficient$ равен:

1) 0.9 для переднего привода автомобиля
2) 0.7 для заднего привода
3) 1 для полного привода.

Коэффициент $frontSuspensionCoefficient$ равен:

1) 1.9 для подвески типа «Независимая, на двойных поперечных рычагах»
2) 1.8 для подвески типа «Многорычажная, независимая»
3) 1.7 для подвески типа «Пневматическая»
4) 1.6 для подвески типа «Независимая, амортизационная стойка типа МакФерсон»
5) 1.5 для подвески типа «Полузависимая, торсионная балка»
6) 1.4 для подвески типа «Зависимая, пружинная»
7) 1.3 для подвески типа «Листовая, пружинная»

Коэффициенты $frontStabilizerCoefficient$ или $backStabilizerCoefficient$ равны:

1) 1.2 в случае наличия переднего или заднего стабилизатора
2) 1.0 в случае отсутствия переднего или заднего стабилизатора

Коэффициент $backSuspensionCoefficient$ равен:

1) 1.9 для подвески типа «Многорычажная, независимая»
2) 1.8 для подвески типа «Независимая, на двойных поперечных рычагах»
3) 1.7 для подвески типа «Пневматическая»
4) 1.6 для подвески типа «Независимая, амортизационная стойка типа МакФерсон»
5) 1.4 для подвески типа «Полузависимая, торсионная балка»
6) 1.3 для подвески типа «Зависимая, пружинная»
7) 1.2 для подвески типа «Листовая, пружинная»

Коэффициент $frontTiresDiameter$ рассчитывается по формуле:

$$frontTiresDiameter = frontTiresRimDiameter + 2 * frontTiresProfile, \tag{8}$$

где $frontTiresRimDiameter$ – диаметр обода передних шин в метрах,

$frontTiresProfile$ – высота профиля передних шин в метрах.

Величина $frontTiresProfile$ рассчитывается по формуле:

$$frontTiresProfile = \frac{frontTiresWidth * frontTiresAspectRatio}{100}, \tag{9}$$

где $frontTiresWidth$ – ширина передних шин в метрах,

$frontTiresAspectRatio$ – процентное соотношение высоты профиля передних шин к их ширине.

Коэффициент $backTiresDiameter$ рассчитывается по формуле:

$$backTiresDiameter = backTiresRimDiameter + 2 * backTiresProfile, \quad (10)$$

где $backTiresRimDiameter$ – диаметр обода передних шин в метрах,

$backTiresProfile$ – высота профиля передних шин в метрах.

Величина $backTiresProfile$ рассчитывается по формуле:

$$backTiresProfile = \frac{backTiresWidth * backTiresAspectRatio}{100}, \quad (11)$$

где $backTiresWidth$ – ширина задних шин в метрах,

$backTiresAspectRatio$ – процентное соотношение высоты профиля задних шин к их ширине.

Коэффициент $frontBrakesCoefficient$ равен:

1) 0.7 для дисковых тормозов
2) 0.5 для барабанных тормозов

Коэффициент $backBrakesCoefficient$ равен:

1) 0.6 для дисковых тормозов
2) 0.4 для барабанных тормозов

Величина $denominator$ рассчитывается по формуле:

$$denominator = mass * wheelbase * (length + width + height) * groundClearance * dragCoefficient) \quad (12)$$

где $mass$ – масса автомобиля в килограммах,

$length$ – длина в метрах,

$width$ – ширина в метрах,

$height$ – высота в метрах,

$groundClearance$ – клиренс в метрах,

$dragCoefficient$ – коэффициент лобового сопротивления.

Величина $controlSystemsCoefficient$ рассчитывается по формуле:

$$controlSystemsCoefficient = absCoefficient + espCoefficient + ebdCoefficient + basCoefficient +, tcsCoefficient \quad (13)$$

где $absCoefficient$ – коэффициент наличия системы ABS,

$espCoefficient$ – коэффициент наличия системы ESP,

$ebdCoefficient$ – коэффициент наличия системы EBD,

$basCoefficient$ – коэффициент наличия системы BAS,

$tcsCoefficient$ – коэффициент наличия системы TCS.

Коэффициент $absCoefficient$ равен:

1) 0.064, если система ABS установлена
2) 0, если система не установлена

Коэффициент $espCoefficient$ равен:

1) 0.07, если система ESP установлена
2) 0, если система не установлена

Коэффициент $ebdCoefficient$ равен:

1) 0.056, если система EBD установлена
2) 0, если система не установлена

Коэффициент $basCoefficient$ равен:

1) 0.059, если система EBD установлена
2) 0, если система не установлена

Коэффициент $tcsCoefficient$ равен:

1) 0.051, если система TCS установлена
2) 0, если система не установлена

Если на странице автомобиля не указаны значения величин, перечисленных выше, то все величины равны по умолчанию 0, за исключением $backTiresAspectRatio$=1, $frontTiresAspectRatio$=1, $frontSuspensionCoefficient$=1, $backSuspensionCoefficient$=1, $dragCoefficient$=0.29, которые равны указанным значениям. Также если все величины в формуле для расчета $denominator$ равны 0, то $denominator$ = 1.

В формуле (4) отражены следующие закономерности в управляемости автомобиля: чем больше коэффициент лобового сопротивления, тем больше нужно энергии автомобилю, чтобы преодолеть воздушное сопротивление, чем выше, массивнее и шире автомобиль и имеет большой клиренс и более длинную колесную базу, тем менее маневренным он является, а также тем выше центр тяжести, что повышает вероятность опрокидывания автомобиля, поэтому эти параметры усложняют управление автомобиля и находятся в знаменателе; в то же время большая мощность двигателя может дать больше энергии для сопротивления воздуха при ускорении и дать большую управляемость, широкие колеи создает большую контактную площадь шин с дорогой, что повышает устойчивость автомобиля и уменьшает вероятность его переворачивания при выполнении маневров, разные типы подвесок по-разному влияют на управляемость, а более широкие колеса повышают сцепление с дорогой, что положительно влияет на управляемость, поэтому данные параметры находятся в числителе. В то же время, в формуле (3) учитывается влияние различных систем контроля движения, таких как ABS, ESP, EBD, BAS, TCS на управляемость автомобиля.

Значения функций принадлежности для множества «Управляемость» можно увидеть на таблице 3:

Таблица 3 – Значения трех функций принадлежности $\mu(h)$, каждая из которых соответствует одну подмножеству множества «Управляемость»

Коэффициент управляемости	0	10	15	20	25	30	35	40	45
Низкая управляемость	1	0.88	0.77	0.66	0.54	0.42	0.35	0.24	0.16
Средняя управляемость	0	0.11	0.21	0.3	0.41	0.51	0.56	0.61	0.66
Высокая управляемость	0	0.01	0.02	0.04	0.05	0.07	0.09	0.15	0.18

Продолжение таблицы 3

Коэффициент управляемости	50	55	60	65	70	75	80	85	
Низкая управляемость	0.13	0.11	0.09	0.07	0.05	0.03	0.02	0	
Средняя управляемость	0.62	0.56	0.45	0.38	0.29	0.2	0.09	0	
Высокая управляемость	0.25	0.33	0.46	0.55	0.66	0.77	0.89	1	

Необходимо отметить, что при $h < 0$, $\mu(h) = 0$ для «Высокой управляемости» и «Средней управляемости», а для «Низкой управляемости» $\mu(h) = 1$. В то же время при $h > 85$, $\mu(h) = 0$ для «Низкой управляемости» и «Средней управляемости», а для «Высокой управляемости» $\mu(h) = 1$.

Функции принадлежности $\mu(h)$ можно представить в виде графика (рисунка 3):

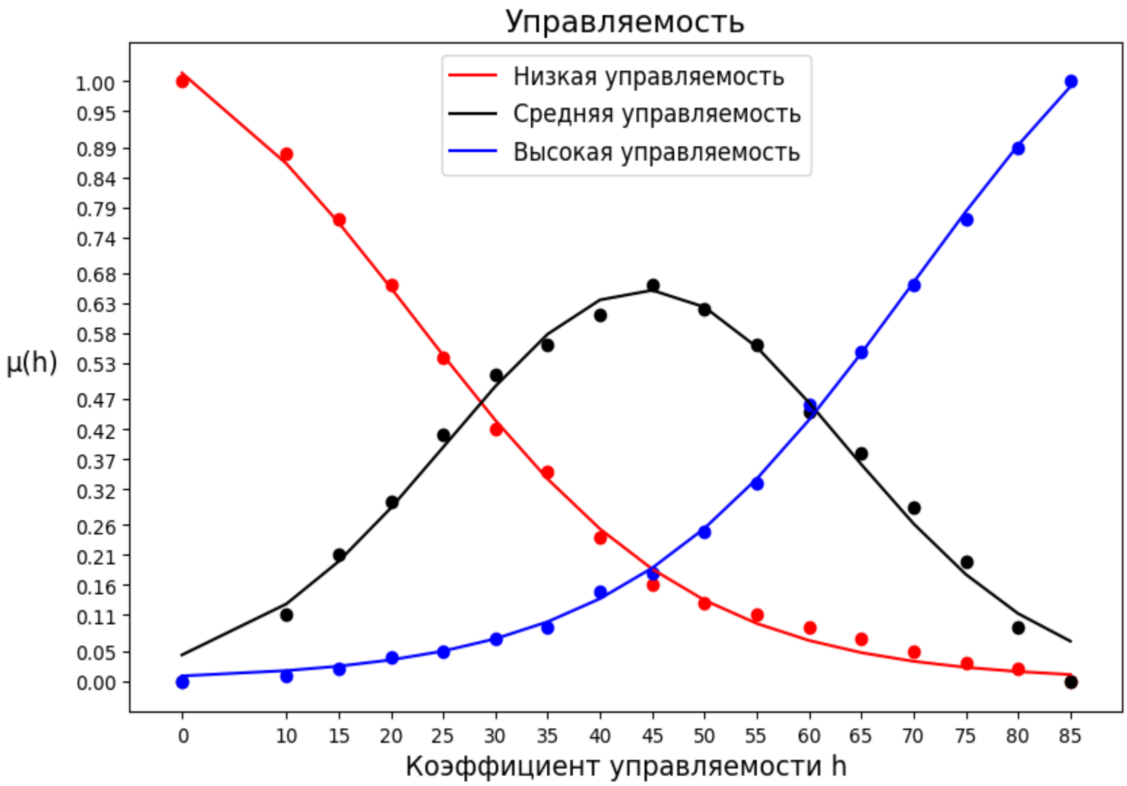

Рисунок 3 – График трех функций принадлежности $\mu(h)$, соответствующих нечетким подмножествам «Низкая управляемость», «Средняя управляемость» «Высокая управляемость» нечеткого множества «Управляемость»

Крупные точки данного графика были отмечены согласно данным таблицы 3.

Графики функций принадлежности $\mu(h)$ были получены путем аппроксимации данных точек методом Левенберга-Марквардта с помощью пакета «Lmfit» языка программирования «Python».

Для аппроксимации точек, нечетко принадлежащих «Низкой управляемости» и «Высокой управляемости» была использована функция «Сигмоида» вида (1), а для аппроксимации точек, нечетко принадлежащих «Средней управляемости» была применена функция Гаусса вида (2).

Итак, для функции принадлежности, соответствующей «Низкой управляемости», были получены параметры L = 1.2027418825694678, k = -0.07501884950616336, c = 22.4088071782321, для функции принадлежности, соответствующей «Средней управляемости», были получены параметры a = 31.124751770295614, μ = 44.305695848946904, σ = 19.042293165507264, для функции принадлежности, соответствующей «Высокой управляемости», были получены параметры L = 1.3245201627428753, k = 0.07214432798281176, c = 69.8908258450921.

Также были построены графики функций принадлежности $\mu(c)$ (области определения для всех трех функций $D(c) = [0, +\infty)$) для нечетких подмножеств «Низкий комфорт», «Средний комфорт», «Высокий комфорт» нечеткого множества «Комфорт». Значениями области определения являются коэффициенты комфорта.

Коэффициент комфорта был рассчитан по формуле:

$$c = (frontSuspensionCoefficient + backSuspensionCoefficient + powerSteeringTypeCoefficient + gearboxCoefficient + climateCoefficient + interiorCoefficient +, lightsCoefficient + electricOptionsCoefficient\ trunkVolumeCoefficient + carAlarmCoefficient + multimediaCoefficient) * sizeCoefficient \quad (14)$$

где $frontSuspensionCoefficient$ – коэффициент типа передней подвески,

$backSuspensionCoefficient$ – коэффициент типа задней подвески,

$powerSteeringTypeCoefficient$ – коэффициент типа усилителя рулевого управления,

$gearboxCoefficient$ – коэффициент типа коробки передач,

$climateCoefficient$ – коэффициент типа климатической установки,

$interiorCoefficient$ – коэффициент типа интерьера автомобиля,

$lightsCoefficient$ – коэффициент оснащения фонарями,

$electricOptionsCoefficient$ – коэффициент наличия электрических опций,

$trunkVolumeCoefficient$ – коэффициент объема багажника,

$carAlarmCoefficient$ – коэффициент наличия сигнализации,

$multimediaCoefficient$ – коэффициент типа мультимедийного оснащения,

$sizeCoefficient$ – коэффициент размерности, который переводит получившееся значение коэффициента комфорта в диапазон значений от 0 до 20. Он равен 0.8.

Коэффициенты $frontSuspensionCoefficient$ или $backSuspensionCoefficient$ равны:

1) 3.8, если передняя или задняя подвеска является «Многорычажной, независимой» и имеет соответственно передний или зданий стабилизатор

2) 3, если передняя или задняя подвеска является «Многорычажной, независимой» и не имеет соответственно передний или зданий стабилизатор
3) 3.6, если передняя или задняя подвеска является «Независимой, на двойных поперечных рычагах» и имеет соответственно передний или зданий стабилизатор
4) 2.8, если передняя или задняя подвеска является «Независимой, на двойных поперечных рычагах» и не имеет соответственно передний или зданий стабилизатор
5) 4, если передняя или задняя подвеска является «Пневматической» и имеет соответственно передний или зданий стабилизатор
6) 3.2, если передняя или задняя подвеска является «Пневматической» и не имеет соответственно передний или зданий стабилизатор
7) 3.4, если передняя или задняя подвеска является «Независимой стойкой типа МакФерсон» и имеет соответственно передний или зданий стабилизатор
8) 2.6, если передняя или задняя подвеска является «Независимой стойкой типа МакФерсон» и не имеет соответственно передний или зданий стабилизатор
9) 2.8, если передняя или задняя подвеска является «Полузависимой, торсионной балкой» и имеет соответственно передний или зданий стабилизатор
10) 2, если передняя или задняя подвеска является «Полузависимой, торсионной балкой» и не имеет соответственно передний или зданий стабилизатор
11) 2.4, если передняя или задняя подвеска является «Зависимой, пружинной» и имеет соответственно передний или зданий стабилизатор

12) 1.6, если передняя или задняя подвеска является «Зависимой, пружинной» и не имеет соответственно передний или здании стабилизатор
13) 1.8, если передняя или задняя подвеска является «Листовой, пружинной» и имеет соответственно передний или здании стабилизатор
14) 1, если передняя или задняя подвеска является «Листовой, пружинной» и не имеет соответственно передний или здании стабилизатор

Если для $frontSuspensionCoefficient$ и $backSuspensionCoefficient$ не найдены значения, то они равны по умолчанию 0.

Коэффициент $powerSteeringTypeCoefficient$ равен:

1) 2, если установлен «Электроусилитель руля» или «Гидроусилитель руля» или «Электрогидроусилитель»
2) 0, если не установлен никакой усилитель рулевого управления

Коэффициент $gearboxCoefficient$ равен:

1) 4, если установлены коробки передач видов «АКПП 6», «АКПП 5», «Вариатор»
2) 0, если не установлены коробки передач данных видов

Коэффициент $climateCoefficient$ равен:

1) 3, если установлен кондиционер и климат-контроль
2) 2 если установлен только кондиционер
3) 0, если не установлены ни кондиционер, ни климат-контроль

Коэффициент $interiorCoefficient$ равен:

1) 0.2962962962962963, если салон автомобиля сделан из кожи
2) 0, если салон автомобиля не сделан из кожи

Коэффициент $lightsCoefficient$, изначально равный нулю, рассчитывается следующим образом (опции могут быть установлены одновременно):

1) увеличивается на 0.8888888888888888, если установлены не «Галогенные фары»
2) увеличивается на 0.2962962962962963, если установлены светодиодные ходовые огни
3) увеличивается на 0.2962962962962963, если установлены светодиодные задние фонари
4) увеличивается на 0.2962962962962963, если установлены передние противотуманные фонари
5) увеличивается на 0.2962962962962963, если установлены задние противотуманные фонари
6) увеличивается на 0.2962962962962963, если установлен датчик света

Коэффициент $electricOptionsCoefficient$, изначально равный нулю, рассчитывается следующим образом (опции могут быть установлены одновременно):

1) увеличивается на 0.2962962962962963, если установлены электрические передние стеклоподъемники
2) увеличивается на 0.2962962962962963, если установлены электрические задние стеклоподъемники
3) увеличивается на 0.2962962962962963, если установлен электрический подогрев передних сидений
4) увеличивается на 0.2962962962962963, если установлен электрический подогрев задних сидений
5) увеличивается на 0.2962962962962963, если установлен электрический подогрев рулевого колеса
6) увеличивается на 0.2962962962962963, если установлен электрический обогрев лобового стекла
7) увеличивается на 0.2962962962962963, если установлен электрический подогрев заднего стекла

8) увеличивается на 0.2962962962962963, если установлен электрический подогрев зеркал
9) увеличивается на 0.2962962962962963, если установлен электрический привод водительского сиденья
10) увеличивается на 0.2962962962962963, если установлены электрические приводы передних сидений
11) увеличивается на 0.2962962962962963, если установлены электрические приводы зеркал
12) увеличивается на 0.2962962962962963, если установлен электрический привод багажника
13) увеличивается на 0.2962962962962963, если установлен датчик дождя

Коэффициент $trunkVolumeCoefficient$ равен:

1) 0.8888888888888888, если объем багажника больше 500 литров
2) 0, если объем багажника менее 500 литров

Коэффициент $carAlarmCoefficient$ равен:

1) 0.5925925925925926, если установлена сигнализация
2) 0, если сигнализация не установлена

Коэффициент $multimediaCoefficient$, изначально равный нулю, рассчитывается следующим образом (опции могут быть установлены одновременно):

1) увеличивается на 0.2962962962962963, если установлен бортовой компьютер
2) увеличивается на 0.2962962962962963, если установлена поддержка MP3
3) увеличивается на 0.2962962962962963, если установлена опция Hands free

Значения функций принадлежности для множества «Комфорт» можно увидеть на таблице 4:

Таблица 4 – Значения трех функций принадлежности μ(c), каждая из которых соответствует одну подмножеству множества «Комфорт»

Коэффициент комфорта	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Низкий комфорт	1	0.87	0.74	0.59	0.42	0.22	0.18	0.13	0.08	0.02	0
Средний комфорт	0	0.11	0.19	0.27	0.41	0.49	0.43	0.33	0.16	0.09	0
Высокий комфорт	0	0.02	0.07	0.14	0.17	0.29	0.39	0.54	0.76	0.89	1

Необходимо отметить, что при $c < 0$, $\mu(c) = 0$ для «Высокого комфорта» и «Среднего комфорта», а для «Низкого комфорта» $\mu(c) = 1$. В то же время при $c > 20$, $\mu(c) = 0$ для «Низкого комфорта» и «Среднего комфорта», а для «Среднего комфорта» $\mu(c) = 1$.

Функции принадлежности $\mu(c)$ можно представить в виде графика (рисунка 4):

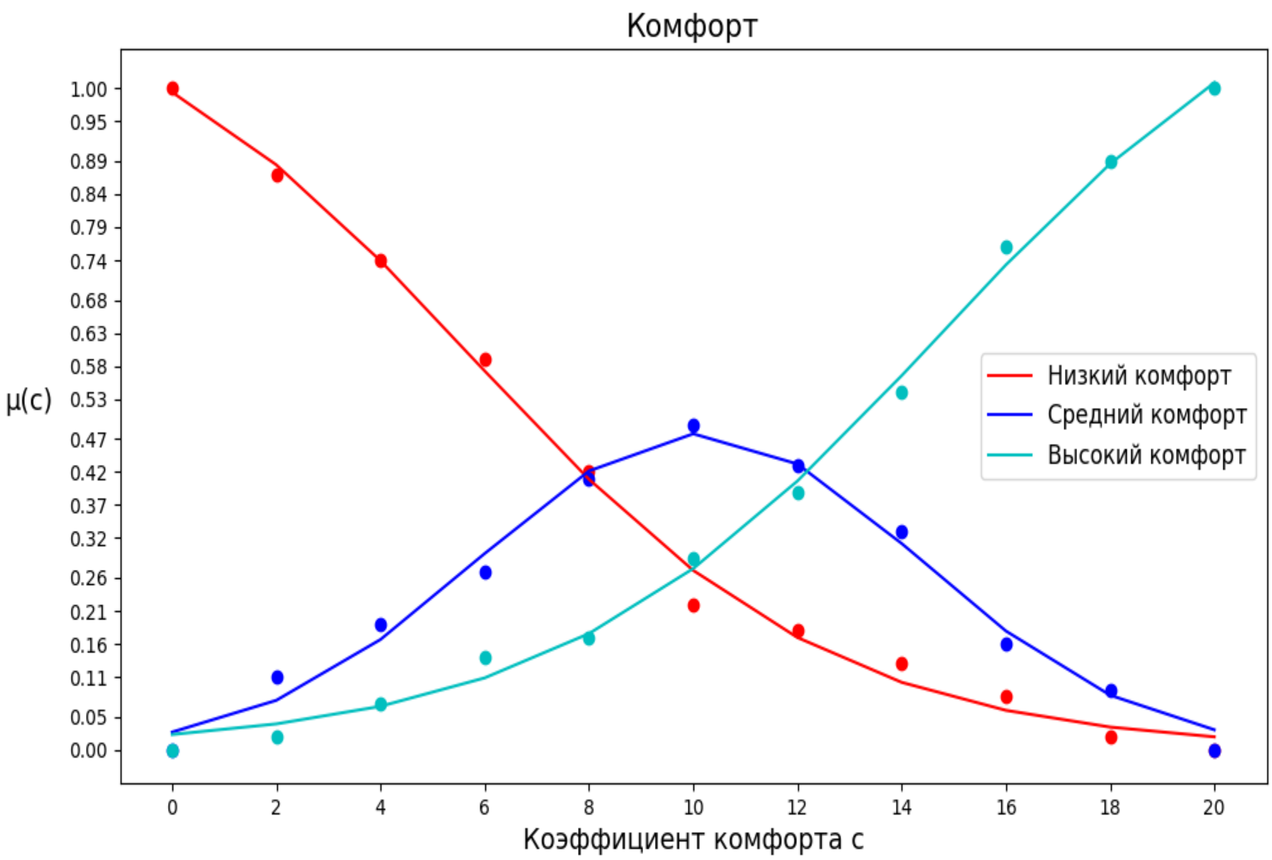

Рисунок 4 – График трех функций принадлежности μ(c), соответствующих нечетким подмножествам «Низкий комфорт», «Средний комфорт» «Высокий комфорт» нечеткого множества «Комфорт»

Крупные точки данного графика были отмечены согласно данным таблицы 4.

Графики функций принадлежности μ(c) были получены путем аппроксимации данных точек методом Левенберга-Марквардта с помощью пакета «Lmfit» языка программирования «Python».

Для аппроксимации точек, нечетко принадлежащих «Низкому комфорту» и «Высокому комфорту» была использована функция «Сигмоида» вида (1), а для аппроксимации точек, нечетко принадлежащих «Среднему комфорту» была применена функция Гаусса вида (2).

Итак, для функции принадлежности, соответствующей «Низкому комфорту», были получены параметры L = 1.1834768835495801, k = -0.2870468773928149, c = 5.7724209993240825, для функции принадлежности, соответствующей «Среднему комфорту», были получены параметры a = 5.0422852289029185, μ = 10.10928688292464, σ = 4.210219040980836, для функции принадлежности, соответствующей «Высокому комфорту», были получены параметры L = 1.2492396969207602, k = 0.27009941927484593, c = 14.702080359730674.

Также были построены графики функций принадлежности $\mu(s)$ (области определения для всех трех функций $D(s) = [0, +\infty)$) для нечетких подмножеств «Низкая безопасность», «Средняя безопасность», «Высокая безопасность» нечеткого множества «Безопасность». Значениями области определения являются коэффициенты безопасности.

Коэффициент безопасности был рассчитан по формуле:

$$s = crashTestEstimate + controlSystemCoefficient + airbagsCoefficient + frontBrakesCoefficient +, backBrakesCoefficient \quad (15)$$

где $crashTestEstimate$ – результат краш-теста автомобиля(=0 по умолчанию),

$controlSystemCoefficient$ – коэффициент наличия систем контроля движения,

$airbagsCoefficient$ – коэффициент наличия подушек безопасности,

$frontBrakesCoefficient$ – коэффициент типа передних тормозов,

$backBrakesCoefficient$ – коэффициент типа задних тормозов.

Коэффициент $controlSystemCoefficient$, изначально равный нулю, рассчитывается следующим образом (системы могут быть установленными одновременно):

1) увеличивается на 3, если установлена система ABS
2) увеличивается на 1, если установлена система ESP
3) увеличивается на 1, если установлена система EBD
4) увеличивается на 1, если установлена система BAS
5) увеличивается на 1, если установлена система TCS

Коэффициент $airbagsCoefficient$, изначально равный нулю, рассчитывается следующим образом (подушки безопасности могут быть установленными одновременно):

1) увеличивается на 1, если установлена подушка безопасности водителя
2) увеличивается на 1, если установлена подушка безопасности переднего пассажира
3) увеличивается на 1, если установлена боковая подушка безопасности
4) увеличивается на 1, если установлены подушки безопасности-шторки

Коэффициент $frontBrakesCoefficient$ равен:

1) 2 для дисковых тормозов
2) 0 для барабанных тормозов

Коэффициент $backBrakesCoefficient$ равен:

1) 2 для дисковых тормозов
2) 0 для барабанных тормозов

Значения функций принадлежности для множества «Безопасность» можно увидеть на таблице 5:

Таблица 5 – Значения трех функций принадлежности $\mu(s)$, каждая из которых соответствует одну подмножеству множества «Безопасность»

Коэффициент безопасности	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Низкая безопасность	1	0.87	0.72	0.59	0.44	0.3	0.25	0.19	0.11	0.05	0
Средняя безопасность	0	0.09	0.21	0.32	0.45	0.51	0.47	0.36	0.18	0.07	0
Высокий безопасность	0	0.04	0.07	0.09	0.11	0.19	0.28	0.45	0.71	0.88	1

Необходимо отметить, что при $s < 0$, $\mu(s) = 0$ для «Высокой безопасности» и «Средней безопасности», а для «Низкой безопасности»

$\mu(s) = 1$. В то же время при $s > 20$, $\mu(s) = 0$ для «Низкой безопасности» и «Средней безопасности», а для «Высокой безопасности» $\mu(s) = 1$.

Функции принадлежности $\mu(s)$ можно представить в виде графика (рисунка 5):

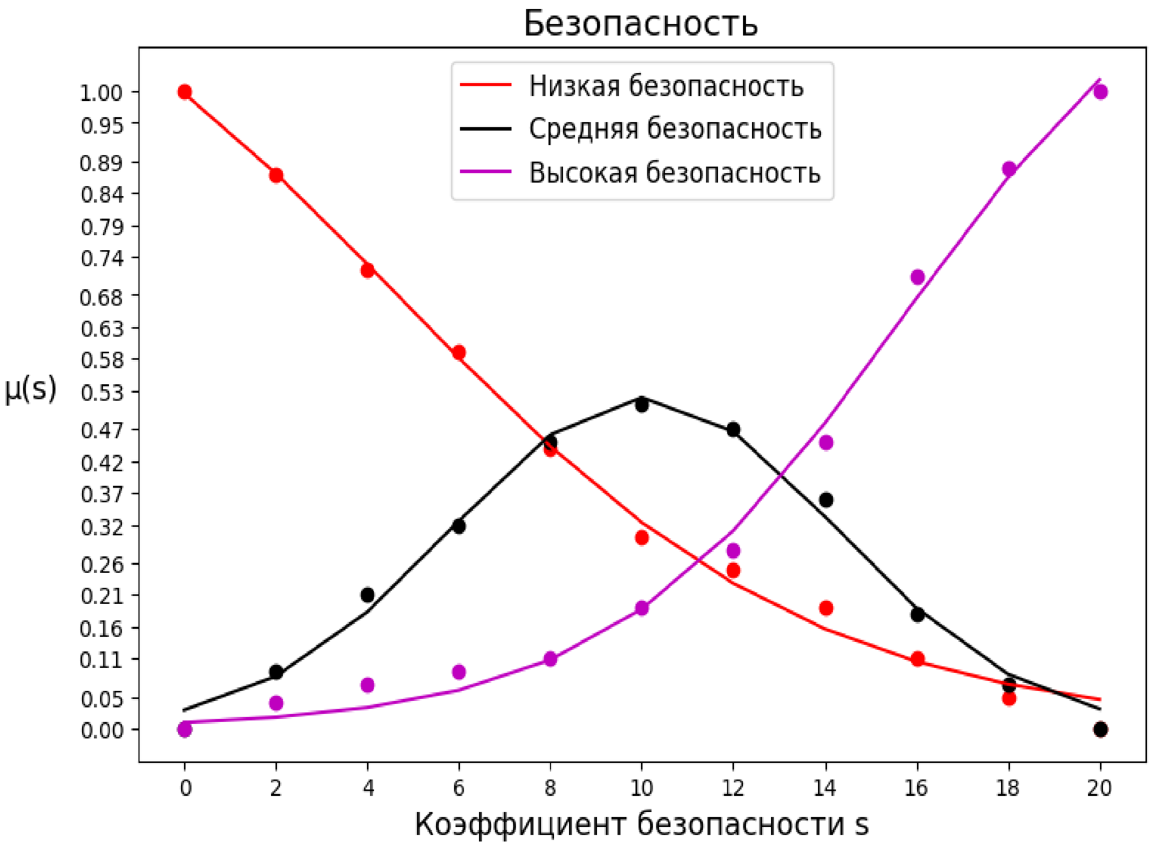

Рисунок 5 – График трех функций принадлежности $\mu(s)$, соответствующих нечетким подмножествам «Низкая безопасность», «Средняя безопасность» «Высокая безопасность» нечеткого множества «Безопасность»

Крупные точки данного графика были отмечены согласно данным таблицы 5.

Графики функций принадлежности $\mu(c)$ были получены путем аппроксимации данных точек методом Левенберга-Марквардта с помощью пакета «Lmfit» языка программирования «Python».

Для аппроксимации точек, нечетко принадлежащих «Низкой безопасности» и «Высокой безопасности» была использована функция

«Сигмоида» вида (1), а для аппроксимации точек, нечетко принадлежащих «Средней безопасности» была применена функция Гаусса вида (2).

Итак, для функции принадлежности, соответствующей «Низкой безопасности», были получены параметры L = 1.3490219429573107, k = -0.21934076866027877, c = 4.73473258614666, для функции принадлежности, соответствующей «Средней безопасности», были получены параметры a = 5.450821590257078, μ = 10.048764235757659, σ = 4.185552288427339, для функции принадлежности, соответствующей «Высокой безопасности», были получены параметры L = 1.2799644032509998, k = 0.3119397892443973, c = 15.65152657451626.

Л.А. Заде в работе [2] впервые ввел понятие нечеткого алгоритма, который согласно [3] представляет собой упорядоченное множество нечетких правил, в формулировке которых содержатся термы.

В данной работе был разработан нечеткий алгоритм, работающий с нечеткими множествами «Экономичность», «Динамика», «Управляемость», «Комфорт» и «Безопасность».

Входными данными для этого алгоритма является выборка автомобилей, составленная в результате опроса пользователя, где пользователя просят указать нижнюю и верхнюю границы стоимости автомобиля, желаемые страны-производители; и произвести расстановку в порядке приоритета лингвистических переменных «Экономичность», «Динамика», «Управляемость», «Комфорт» и «Безопасность».

Пользователь может расставить в порядке приоритета любое количество лингвистических переменных из 5 возможных. Другими словами, он может выбрать или 1, или 2, или 3, или 4, или 5 переменных из доступных 5 переменных. Например, пользователь может выбрать комбинацию «Динамика», «Экономичность», «Безопасность», «Управляемость», «Комфорт» или комбинацию «Динамика», «Безопасность», «Комфорт», «Экономичность», «Управляемость», или комбинацию «Комфорт», «Безопасность», «Динамика», «Экономичность», или комбинацию

«Управляемость», «Динамика», «Комфорт» или «Экономичность» и так далее. Можно вычислить количество всех возможных комбинаций, которые может составить пользователь. Для расчета количества комбинаций, содержащих 5 переменных из 5 возможных, с учетом порядка и с условием, что все переменные в комбинации не повторяются, необходимо применить формулу расчета количества размещений:

$$A_n^k = \frac{n!}{(n-k)!}, \qquad (16)$$

где n – количество элементов в наборе,

k – количество элементов в каждой комбинации.

Получается, что количество таких комбинаций равно $A_5^5 = \frac{5!}{(5-5)!} = 120$. Для выборки из 4 переменных из 5 возможных количество комбинаций будет равно

$A_5^4 = \frac{5!}{(5-4)!} = 120$. А для выборки из 3 элементов количество комбинаций равно $A_5^3 = \frac{5!}{(5-3)!} = 60$. Аналогично для выборки из 2 элементов количество комбинаций равно $A_5^2 = \frac{5!}{(5-2)!} = 20$. И наконец, для выборки из 1 элемента количество комбинаций равно $A_5^1 = \frac{5!}{(5-1)!} = 5$. Таким образом, существует A_5^5 + A_5^4 + A_5^3 + A_5^2 + A_5^1 = 120 + 120 + 60 + 20 + 5 = 325 возможных расстановок приоритетов, которые может сгенерировать пользователь.

Для каждой из 325 комбинаций были составлены наборы нечетких правил. Данные правила были построены по схеме логической импликации «ЕСЛИ-ТО», где условие «ЕСЛИ» соответствует принятию лингвистическими переменными «Экономичность», «Динамика», «Управляемость», «Комфорт», «Безопасность» различных значений (термов), таких как «Средний расход», «Высокий комфорт», «Низкая управляемость», «Средняя безопасность», «Высокая динамика» и так далее, а вывод «ТО» означает необходимость выбора некоторого значения для лингвистической переменной «Рекомендация». Данная переменная принимает значение, которое определяет, с какой степенью будет рекомендоваться автомобиль.

Например, для комбинации «Комфорт», «Безопасность», «Динамика», «Экономичность», «Управляемость» одно из правил выглядит следующим образом:

ЕСЛИ «Комфорт» = «Высокий комфорт» и «Безопасность» = «Высокая безопасность» и «Динамика» = «Низкая динамика» и «Экономичность» = «Высокий расход» и «Управляемость» = «Высокая управляемость», ТО «Рекомендация» = 223.

А для комбинации «Экономичность», «Динамика», «Управляемость» одно из правил выглядит следующим образом:

ЕСЛИ «Экономичность» = «Высокий расход» и «Динамика» = «Высокая Динамика» и «Управляемость» = «Средняя управляемость», ТО «Рекомендация» = 8.

Можно посчитать количество правил для комбинаций, состоящих из 5, 4, 3, 2 и 1 переменных с помощью следующей формулы:

$$\text{С}_r = n^r, \quad (17)$$

где n – количество возможных значений переменной,

r – количество переменных.

Таким образом, количество правил для любой комбинации, состоящей из 5 переменных, равно $\text{С}_5 = 3^5 = 243$, в случае комбинаций из 4 переменных их количество равно $\text{С}_4 = 3^4 = 81$, в случае комбинаций из 3 переменных их количество равно $\text{С}_3 = 3^3 = 27$, в случае комбинаций из 2 переменных их количество равно $\text{С}_2 = 3^2 = 9$, в случае комбинаций из 1 переменной их количество равно $\text{С}_1 = 3^1 = 3$.

Правила, построенные по данной схеме, согласно [32] представляют собой реализацию известного в математической логике правила вывода modus ponens, согласно которому от утверждения об истинности условия, например, («Высокий расход», «Высокая динамика», «Средняя управляемость») с помощью посылки (в этом случае, опроса пользователей и знаний экспертов) («Высокий расход», «Высокая динамика», «Средняя управляемость») → «8» можно перейти к утверждению об истинности заключения «8».

Вообще механизм построения правил принятия решений в любой задаче согласно [3] включает в себя:

1) Формирование цели, для достижения которой принимаются решения
2) Создание механизма упрощения, предоставляющего возможность выделить существенные факторы и пренебречь второстепенными
3) Определение начального состояния, желаемого состояния и правил действий, переводящих систему из начального в желаемое конечное состояние

Применим указанное выше в качестве примера правило (ЕСЛИ «Экономичность» = «Высокий расход» и «Динамика» = «Высокая Динамика» и «Управляемость» = «Средняя управляемость», ТО «Рекомендация» = 8) к автомобилю, который имеет расход топлива, равный 12.4 л/100 км, время разгона 0-100 км/ч, с, равное 10.1 секундам и коэффициент управляемости, равный 54.6835222205345. Вычислим степень принадлежности значения 12.4 л./100 км нечеткому подмножеству «Высокий расход» путем подстановки значения 12.4 в функцию «Сигмоида» (1), параметры для которой были вычислены в результате аппроксимации. Получилось, что $\mu(x) = 0.6837290592783479$. Убедиться в правильности вычисления можно на графике (рисунке 6):

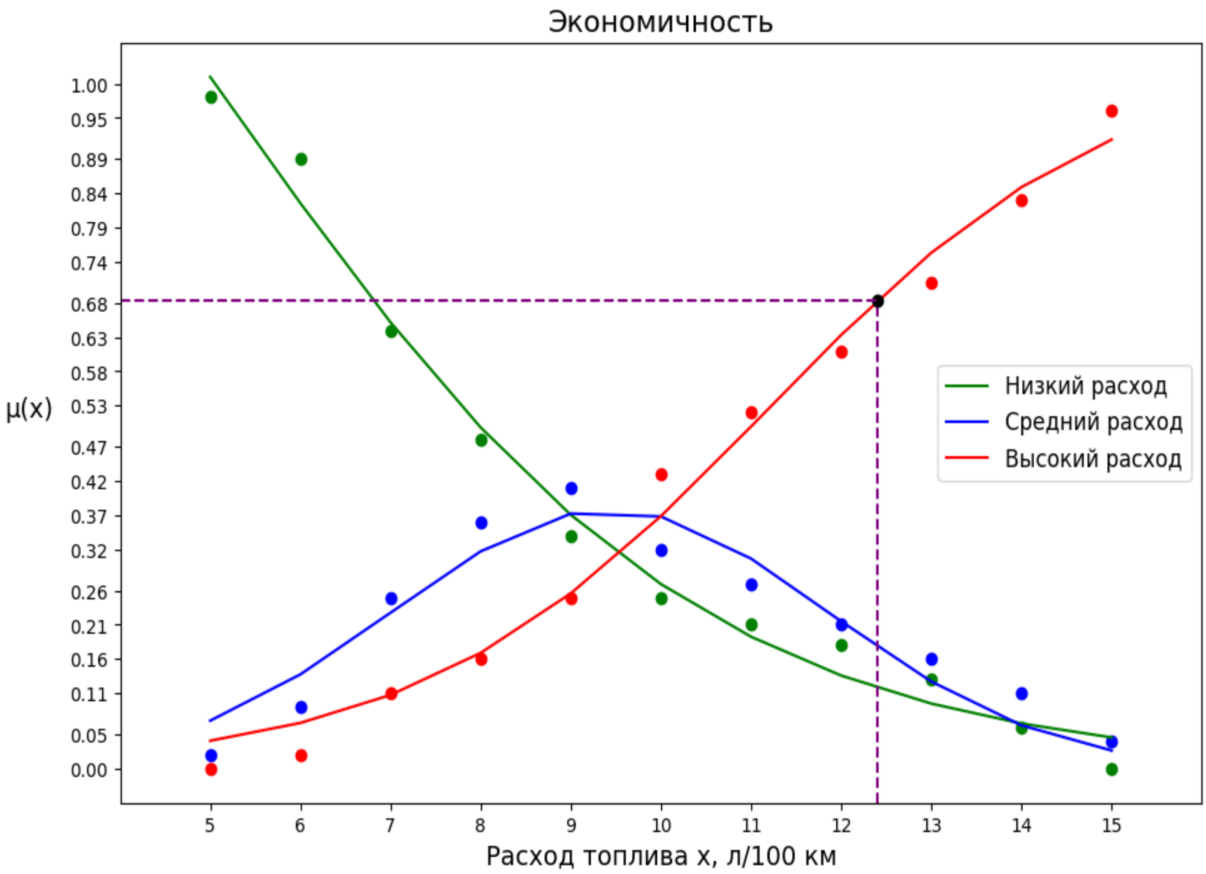

Рисунок 6 – График трех функций принадлежности $\mu(x)$, соответствующих нечетким подмножествам «Низкий расход», «Средний расход», «Высокий расход» нечеткого множества «Экономичность». Черная точка соответствует конкретному расходу 12.4 рассматриваемого автомобиля, фиолетовые линии помогают проверить достоверность полученного значения функций $\mu(x)$ для подмножества «Высокий расход»

Далее вычислим степень принадлежности значения 10.1 секунд времени разгона от 0 до 100 км/ч нечеткому подмножеству «Высокая динамика» путем подстановки значения 10.1 в функцию «Сигмоида» (1), параметры для которой были вычислены в результате аппроксимации. Получилось, что $\mu(d) = 0.314408486210387$. Убедиться в правильности вычисления можно на графике (рисунке 7):

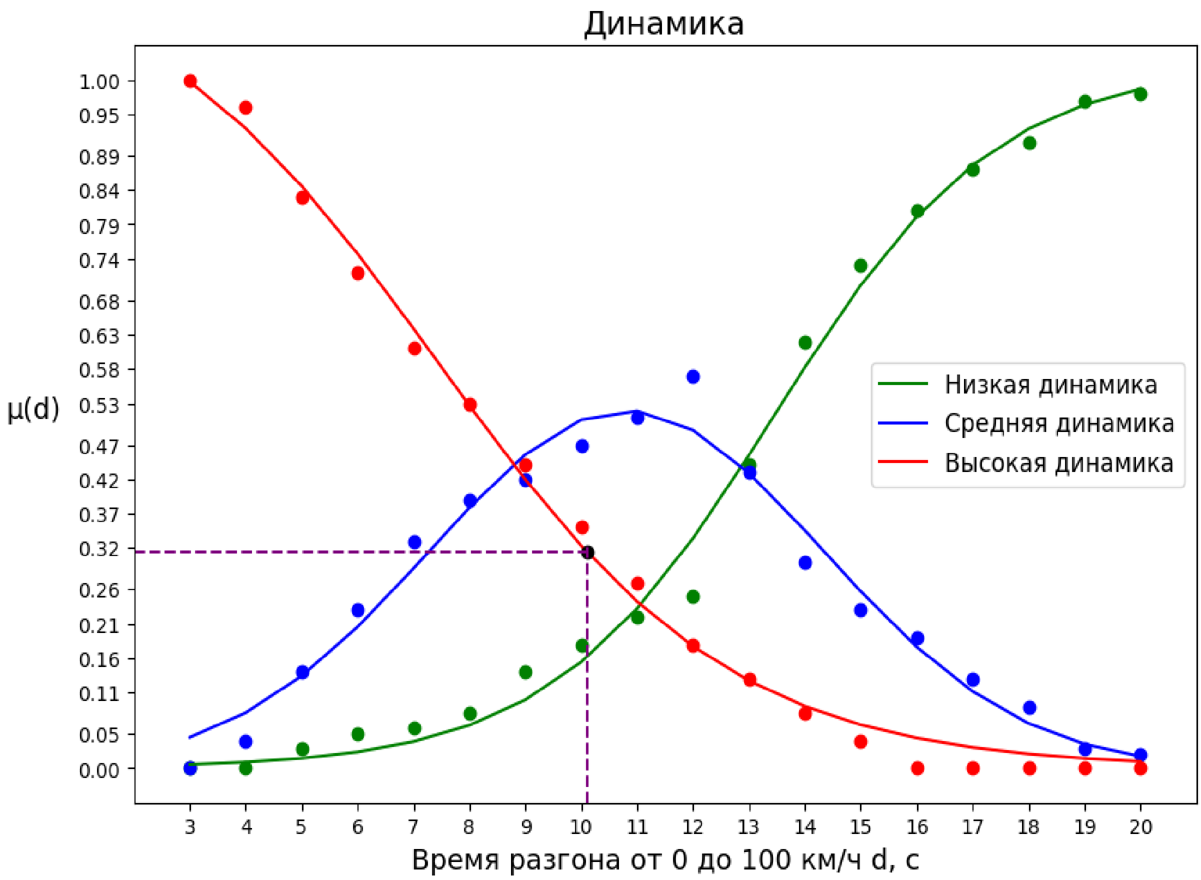

Рисунок 7 – График трех функций принадлежности $\mu(d)$, соответствующих нечетким подмножествам «Низкая динамика», «Средняя динамика», «Высокая динамика» нечеткого множества «Динамика». Черная точка соответствует времени разгона, равное 10.1 секундам, рассматриваемого автомобиля, фиолетовые линии помогают проверить достоверность полученного значения функций $\mu(d)$ для подмножества «Высокая динамика»

Вычислим степень принадлежности значения 54.6835222205345 нечеткому подмножеству «Средняя управляемость» путем его подстановки в функцию Гаусса (2), параметры для которой были вычислены в результате аппроксимации. Получилось, что $\mu(h) = 0.562084142061749$. Убедиться в правильности вычисления можно на графике (рисунке 8):

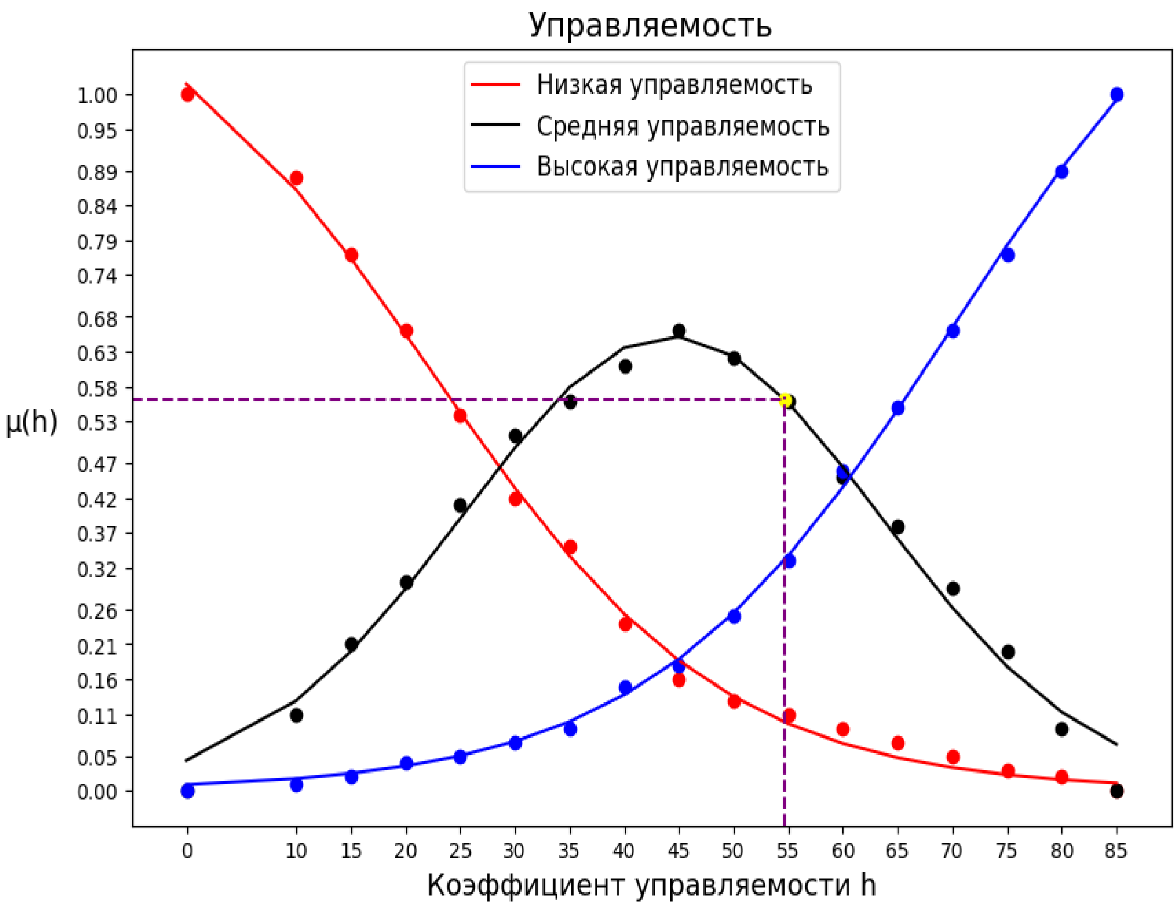

Рисунок 8 – График трех функций принадлежности $\mu(h)$, соответствующих нечетким подмножествам «Низкая управляемость», «Средняя управляемость», «Высокая управляемость» нечеткого множества «Управляемость». Желтая точка соответствует значению коэффициента управляемости, равному 54.6835222205345, для рассматриваемого автомобиля, фиолетовые линии помогают проверить достоверность полученного значения функций $\mu(h)$ для подмножества «Средняя управляемость».

В данном нечетком правиле, как и в остальных, используется операция пересечения или конъюнкция, соответствующая логической операции «И», которая согласно [32] определяется, как наибольшее нечеткое множество $A \cap B$, являющееся одновременно подмножеством множеств A и B. Функция принадлежности множества $A \cap B$ выражается с помощью операции нахождения минимума:

$$\mu_{A\cap B}(x) = \min\{\mu_A(x);\ \mu_B(x)\}, \forall x \in X, \quad (18)$$

где $\mu_A(x)$ – функция принадлежности нечеткого множества A,

$\mu_B(x)$ – функция принадлежности нечеткого множества B.

В общем случае:

$$\mu_{A_1\cap A_2\ldots\cap A_n}(x) = \min\{\mu_{A_1}(x);\ \mu_{A_2}(x); \ldots; \mu_{A_n}(x)\}, \forall x \in X, \quad (19)$$

где $\mu_{A_1}(x)$ – функция принадлежности нечеткого множества A_1,

$\mu_{A_2}(x)$ – функция принадлежности нечеткого множества A_2,

$\mu_{A_n}(x)$ – функция принадлежности нечеткого множества A_n,

n – количество переменных в правиле.

Применим данную операцию в данном правиле для подмножеств «Высокий расход», «Высокая Динамика», «Средняя управляемость» и (Рекомендация = 8) Обозначим их как подмножества A_1, B_1, C_1, G_1 соответственно:

$$\mu_{A_1\cap B_1\cap C_1}(r) = \mu_{G_1}(r)|_{x=12.4,d=10.1,h=54.683\ldots} = \min\{$$
$$0.6837290592783479; 0.314408486210387; 0.562084142061749;$$
$$\mu_{G_1}(r)\} = 0.314408486210387\mu_{G_1}(r)$$

При вычислении функции принадлежности $\mu_{A_1\cap B_1\cap C_1}(r) = \mu_{G_1}(r)|_{x=12.4,d=10.1,h=54.683..}$ множества G_1 будем полагать, что для данного правила будет выполняться пропорциональное уменьшение значения функции принадлежности для значений нечеткого подмножества «8» множества «Рекомендация» в соответствии с уровнем выполнения условия («Экономичность» = «Высокий расход» и «Динамика» = «Высокая Динамика» и «Управляемость» = «Средняя управляемость») рассматриваемого правила. Графически это можно изобразить следующим образом на рисунке 9:

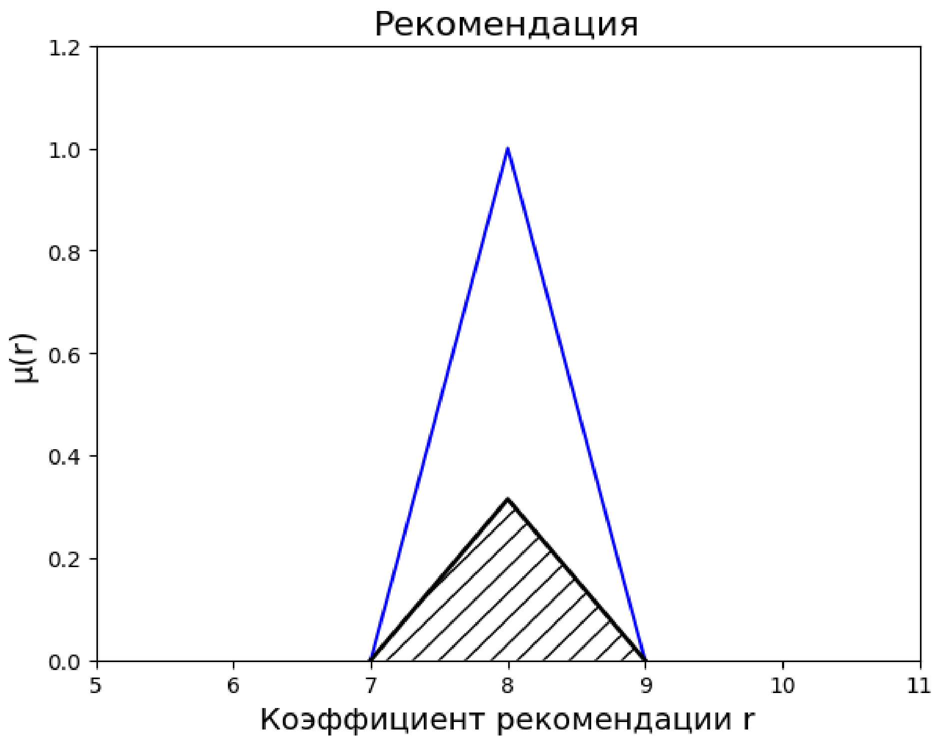

Рисунок 9 – График функции принадлежности нечеткого подмножества «8» множества «Рекомендация»

Данная функция является кусочной и имеет формулу:

$$\mu(r) = \begin{cases} 0, \text{если } r \le leftBound \text{ или } r \ge rightBound, \\ r - leftBound, \text{если } leftBound \le r \le center, \\ r - rightBound, \text{если } center \le r \le rightBound. \end{cases} \quad (20)$$

где leftBound – координата абсцисс левой нижней вершины фигуры графика,

rightBound – координата абсцисс правой нижней вершины фигуры графика,

center – координата центральной точки основания фигуры графика.

Возьмем другое правило, соответствующее данной расстановке приоритетов «Экономичность», «Динамика», «Управляемость»:

ЕСЛИ «Экономичность» = «Высокий расход» и «Динамика» = «Средняя Динамика» и «Управляемость» = «Средняя управляемость», ТО «Рекомендация» = 5.

Степень принадлежности значения 12.4 л./100 км нечеткому подмножеству «Высокий расход» $\mu(x) = 0.6837290592783479$, степень принадлежности значения 10.1 секунд времени разгона от 0 до 100 км/ч нечеткому подмножеству «Средняя динамика» $\mu(d) = 0.5092384056124543$, а степень принадлежности значения 54.6835222205345 нечеткому подмножеству «Средняя управляемость» $\mu(h) = 0.562084142061749$.

Построим функцию принадлежности нечеткого подмножества (Рекомендация = 5) так же, как было сделано ранее. Обозначим нечеткие подмножества «Высокий расход», «Средняя динамика», «Средняя управляемость», (Рекомендация = 5) как A_2, B_2, C_2, G_2 соответственно и получим:

$$\mu_{A_2\cap B_2\cap C_2}(r) = \mu_{G_2}(r)|_{x=12.4,d=10.1,h=54.683\ldots} = \min\{ 0.6837290592783479; 0.5092384056124543; 0.562084142061749; \mu_{G_2}(r)\} = 0.5092384056124543\mu_{G_2}(r)$$

Изобразим полученную функцию на рисунке 10:

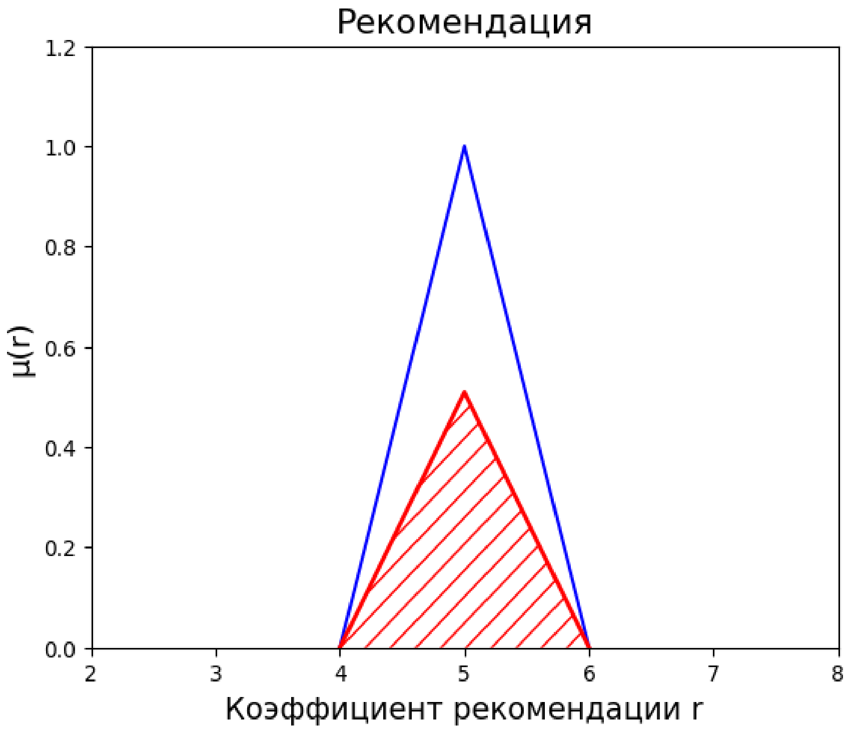

Рисунок 10 – График функции принадлежности нечеткого подмножества «5» множества «Рекомендация»

Оба рассмотренных правила действуют совместно и связаны с друг другом с помощью союза ИЛИ, то есть можно записать:

ЕСЛИ «Экономичность» = «Высокий расход» и «Динамика» = «Высокая Динамика» и «Управляемость» = «Средняя управляемость», ТО «Рекомендация» = 8.

ИЛИ

ЕСЛИ «Экономичность» = «Высокий расход» и «Динамика» = «Средняя Динамика» и «Управляемость» = «Средняя управляемость», ТО «Рекомендация» = 5

Тогда результирующая функция принадлежности вычисляется по формуле:

$$\mu_{A \cup B}(x) = max\{\mu_A(x);\ \mu_B(x)\}, \forall x \in X, \quad (21)$$

где $\mu_A(x)$ – функция принадлежности нечеткого множества A,

$\mu_B(x)$ – функция принадлежности нечеткого множества B.

В данном случае $\mu_G(r) = \mu_{G_1 \cup G_2}(r) = max\{\mu_{G_1}(r)|_{x=12.4,d=10.1,h=54.683...}; \mu_{G_2}(r)|_{x=12.4,d=10.1,h=54.683...}\}$

График полученной функции принадлежности можно увидеть на рисунке 11:

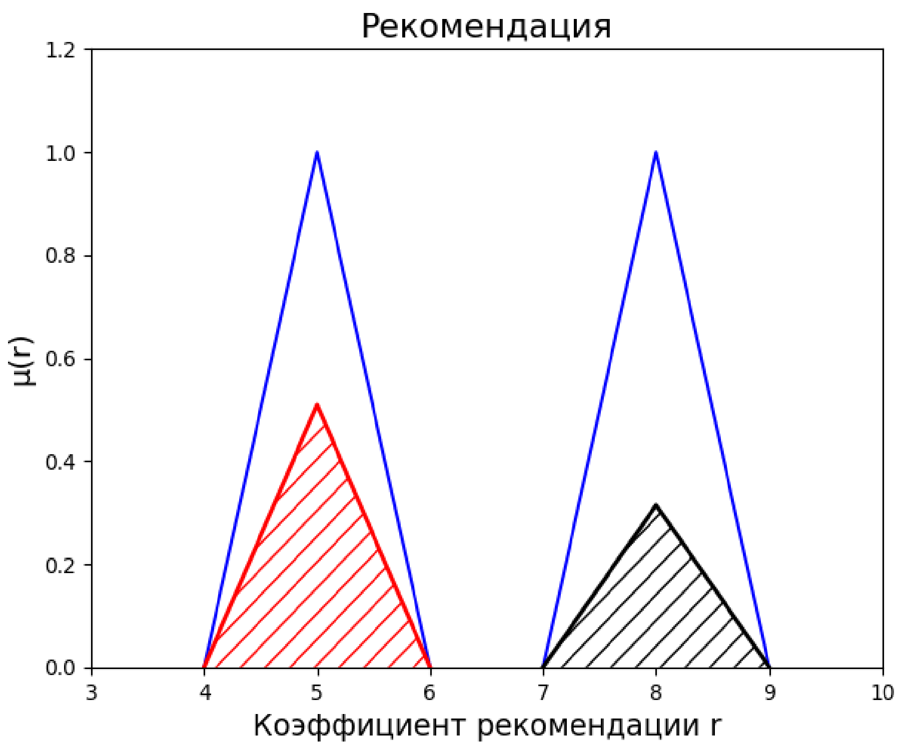

Рисунок 11 – График результирующей функции принадлежности $\mu_G(r)$

Описанный метод построения функции принадлежности выходного нечеткого множества согласно [32] является методом Максимума-Произведения.

Построенная функция наглядно показывает работу метода, однако не является желаемым результатом работы алгоритма. Для получения желаемого результата необходимо построить функции принадлежности нечетких подмножеств нечеткого множества «Рекомендация» для оставшихся 25 правил данной комбинации («Экономичность», «Динамика», «Управляемость»), применяя описанное выше логическое правило «И», и построить результирующую функцию принадлежности для всех 27 правил по формуле:

$$\mu_G(r) = \mu_{G_1 \cup G_2 \ldots G_n}(r) = \\ max\{\mu_{G_1}(r);\ \mu_{G_2}(r); \ldots ; \mu_{G_n}(r)\}, \forall r \in R, \tag{22}$$

где $\mu_{G_1}(r)$ – функция принадлежности нечеткого подмножества G_1 множества «Рекомендация»,

$\mu_{G_2}(r)$ – функция принадлежности нечеткого подмножества G_2 множества «Рекомендация»,

$\mu_{G_n}(r)$ – функция принадлежности нечеткого подмножества G_n множества «Рекомендация»,

n – количество правил для данной комбинации.

Описанный метод построения функции принадлежности выходного нечеткого множества согласно [32] является методом Максимума-Произведения. Однако полученный результат является всего лишь нечетким множеством, описываемым результирующей функцией. Чтобы получить конкретное число или четкое значение (в какой степени будет рекомендоваться автомобиль), необходимо применить один из методов дефаззификации. Пусть эти методом будет метод центра тяжести. Согласно этому методу в качестве выходного значения R* выбирается абсцисса центра тяжести площади, расположенной под функцией принадлежности:

$$R^* = \frac{\int_a^b \mathrm{r}\mu_G(r)dr}{\int_a^b \mu_G(r)dr}, \tag{23}$$

где $\mu_G(r)$ – функция принадлежности нечеткого подмножества G множества «Рекомендация, r – значение коэффициента рекомендации.

Поскольку график полученного нечеткого множество состоит из нескольких фигур, то применим метод центра тяжести к каждой из фигур:

$$R_1{}^* = \frac{\int_a^b \mathrm{r}\mu_{G_1}(r)dr}{\int_a^b \mu_{G_1}(r)dr} = 8.0$$

$$R_2{}^* = \frac{\int_a^b \mathrm{r}\mu_{G_2}(r)dr}{\int_a^b \mu_{G_2}(r)dr} = 5.000000000000049$$

И подставим полученные значения в формулу для расчета средневзвешенного среднего:

$$R^* = \frac{S_1 * R_1{}^* + S_2 * R_2{}^*}{S_1 + S_2}, \tag{24}$$

где S_1, S_2 – площади фигур(треугольников), образуемых графиками функций принадлежности подмножеств множества «Рекомендация», рассчитываемых по формуле:

$$S = 0.5 * a * \mu_G(r), \tag{25}$$

где a – основание треугольника,

$\mu_G(r)$ – его высота.

В итоге получаем результат логического вывода (результат работы нечеткого алгоритма) для двух правил:

$$R^* = (0.314408486210387 * 8.0 + 0.5092384056124543 * 5.000000000000049)\frac{1}{(0.314408486210387 + 0.5092384056124543)} = 6.145181834588972$$

Необходимо отметить, что расчет интегралов производился с помощью численного метода: метода трапеций.

Чтобы получить результат логического вывода для данной комбинации (расстановки приоритетов) «Экономичность», «Динамика», «Управляемость» необходимо применить метод центра тяжести, пользуясь формулой (23), для каждой из 27 фигур, образованных графиками функций принадлежности подмножеств множества «Рекомендация», рассчитать площади этих фигур по формуле (24), и наконец, полученные значения подставить в формулу для расчета средневзвешенного значения, которая в общем случае выглядит так:

$$R^* = \frac{S_1 * {R_1}^* + S_2 * {R_2}^* \dots + S_n * {R_n}^*}{S_1 + S_2 + \dots + S_n}, \tag{26}$$

где S_1, S_2, S_n – площади фигур,

R_1, R_1, R_n, – абсциссы центра тяжести фигур,

n – количество правил в комбинации.

Необходимо отметить, что формулы для расчета коэффициентов «Управляемости», «Комфорта» и «Безопасности», впервые введенные в данной работе, не являются официально используемыми, а лишь предлагают примерное описание данных характеристик автомобилей и могут быть дополнены при проведении более тщательных исследований.

Реализация нечеткого алгоритма выполнена в файле fuzzy_algorithm.go

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Zadeh, L.A Fuzzy Sets // Univ. of Calophornia, Berkley, Memo. ERL. – 1964. No. 64-44.
2. Zadeh, L.A. Fuzzy Algorithms // Information and Control. – Vol. 12. – 1968. – P. 94-102.
3. Васильев В.И., Ильясов Б.Г. Интеллектуальные системы управления. Теория и практика: учебное пособие. — М.: Радиотехника, 2009. — 392 с.: ил.