

## Нечеткие когнитивные карты в анализе надежности систем

Александр П. Ротштейн, Иерусалимский политехнический институт – Махон Лев, Иерусалим, Израиль;  
Донецкий национальный университет им. В.Стуса, Винница, Украина



Александр П.  
Ротштейн

**Резюме. Цель.** Начальным этапом моделирования надежности сложной системы является ее структуризация, т.е. разбиение на составные части (блоки, узлы, элементы), для которых известны вероятности отказов. Классическая теория надежности использует понятие структурной функции, которая позволяет ранжировать элементы по важности, что необходимо для оптимального распределения ресурсов, выделенных на обеспечение надежности системы. Для структуризации человеко-машинных систем используется алгоритмическое описание дискретных процессов функционирования, где наличие четких границ между отдельными операциями позволяет собирать статистику о вероятностях ошибок, необходимую для моделирования. Трудности алгоритмизации возникают в человеко-машинных системах с непрерывным характером деятельности человека, где отсутствие четких границ между операциями не позволяет корректно оценивать вероятности их правильного выполнения. Поэтому процесс функционирования приходится рассматривать как единую операцию, правильность выполнения которой зависит от разнородных и взаимосвязанных эргатических, технических, программных, организационных и других факторов. Моделируемая система превращается в «черный ящик» с неизвестной структурой (выход – надежность, входы – влияющие факторы), а традиционная для теории надежности задача ранжирования элементов сводится к задаче ранжирования факторов. Наиболее популярным средством многофакторного моделирования надежности человеко-машинных систем является регрессионный анализ. Он требует большого числа экспериментальных данных и не приспособлен к работе с качественными факторами, измеряемыми экспертно. Удобным средством обработки экспертной информации являются нечеткие правила «если – то». Однако регрессионный анализ и нечеткие правила обладают общим ограничением: они предполагают независимость входных переменных, т.е. влияющих факторов. Этого ограничения лишены нечеткие когнитивные карты – новое средство моделирования, пока не получившее распространения в теории надежности. Цель статьи – привлечь внимание к моделированию надежности с помощью нечетких когнитивных карт. **Метод.** На основе теории нечетких когнитивных карт предлагается метод ранжирования факторов, влияющих на надежность системы. В основу метода положена формализация причинно-следственных связей «влияющие факторы – надежность» в виде нечеткой когнитивной карты, т.е. ориентированного графа, вершины которого соответствуют надежности системы и влияющим факторам, а взвешенные дуги отражают силы влияний факторов друг на друга и на надежность системы. Ранг фактора определен как аналог индекса важности элемента по Бирнбауму, который в вероятностной теории надежности вычисляется на основе структурной функции. **Результаты.** Предлагаются модели и алгоритмы вычисления индексов важности единичных факторов и их парных эффектов, влияющих на надежность системы, представленной нечеткой когнитивной картой. Метод иллюстрируется на примере надежности и безопасности автомобиля в системе «водитель-автомобиль-дорога» с учетом квалификации водителя, дорожных условий, удельных затрат на эксплуатацию, условий эксплуатации, периодичности технического обслуживания, качества обслуживания и ремонта, качества конструкции автомобиля, качества эксплуатационных материалов и запасных частей, а также условий хранения. **Выводы.** Достоинствами метода являются: а) использование доступной экспертной информации без сбора и обработки статистических данных; б) возможность учета любых количественных и качественных факторов, связанных с человеком, техникой, программным обеспечением, качеством обслуживания, условиями эксплуатации и других; в) простота расширения числа учитываемых факторов за счет введения дополнительных вершин и дуг графа когнитивной карты. Возможными объектами применения метода могут быть сложные системы с нечетко определенной структурой, надежность которых сильно зависит от взаимосвязанных факторов, измеряемых экспертно.

**Ключевые слова:** нечеткая когнитивная карта, надежность системы, влияющие факторы, ранжирование факторов, надежность и безопасность автомобиля.

**Для цитирования:** Ротштейн А.П. Нечеткие когнитивные карты в анализе надежности систем // Надежность. 2019. № 4. С. 24-31. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2019-19-4-24-31>

Поступила 13.04.2019 г. / После доработки 22.09.2019 г. / К печати 14.12.2019 г.

## 1. Введение

Успех в решении прикладных задач моделирования в значительной мере определяется выбором математического аппарата. Теория вероятности, лежащая в основе классической теории надежности, плохо приспособлена к формализации экспертных знаний, которые могут быть полезными для принятия решений.

Цель этой статьи – привлечь внимание к моделированию надежности с помощью нечетких когнитивных карт. В ней приводятся основные соотношения этого аппарата и на их основе предлагается метод ранжирования факторов, влияющих на надежность системы. Метод иллюстрируется на примере моделирования надежности и безопасности автомобиля с учетом технических, эргатических, средовых и организационных факторов.

## 2. Структуризация: от элементов к факторам

Начальным этапом моделирования надежности сложной системы является ее структуризация, т.е. разбиение на составные части (блоки, узлы, элементы), для которых известны вероятности отказов.

Классическая теория надежности [1] использует понятие структурной (логической) функции, которая связывает логическое условие работоспособности системы (1 – нет отказа, 0 – есть отказ) с аналогичными условиями для ее элементов. Переход от структурной функции к вероятностной модели надежности осуществляется по правилам логики-вероятностного исчисления [2]. Структурная функция позволяет ранжировать элементы по важности, что необходимо для оптимального распределения ресурсов, выделенных на обеспечение надежности системы.

Для структуризации человеко-машинных систем используется алгоритмическое описание процессов функционирования [3, 4]. В этом случае исходными данными для расчета надежности являются вероятности правильного выполнения основных, контрольных и диагностических операций. Правила перехода от логики-алгоритмического описания системы на языке алгебры алгоритмов В.М. Глушкова [5] к вероятностным и нечетким моделям надежности предложены в [6, 7].

Алгоритмическое описание является естественным способом формализации систем с дискретными процессами функционирования, например, автоматизированных систем обработки данных и управления, сборочно-монтажного производства и других, где наличие четких границ между отдельными операциями позволяет собирать статистику о вероятностях ошибок, необходимую для моделирования.

Трудности алгоритмизации возникают в человеко-машинных системах с непрерывным характером деятельности человека, где преобладают операции слежения и принятия решений. Примерами служат системы управления на транспорте, в химической и

ядерной промышленности и другие системы с повышенной опасностью, где ошибки человека приводят к катастрофическим последствиям.

Отсутствие четких границ между операциями не позволяет корректно оценивать вероятности их правильного выполнения. Поэтому весь процесс функционирования приходится рассматривать как единую операцию, правильность выполнения которой зависит от многих разнородных и взаимосвязанных факторов: эргатических, технических, программных, организационных и других. Моделируемая система представляет собой «черный ящик» с неизвестной структурой: выход – надежность, входы – влияющие факторы. В этом случае традиционная для теории надежности задача ранжирования элементов превращается в задачу ранжирования факторов. В частности, в [8] отмечается, что трудности учета влияющих факторов приводят к невозможности точного прогнозирования вероятности отказа, что вызывает недоверие к расчетам надежности.

Наиболее популярным средством многофакторного моделирования надежности человеко-машинных систем является регрессионный анализ (см. например, [9]). Он требует большого числа экспериментальных данных и не приспособлен к работе с качественными факторами, измеряемыми экспертно. Удобным средством обработки экспертной информации являются нечеткие правила «если – то» [10]. Регрессионный анализ и нечеткие правила обладают общим ограничением: они предполагают независимость входных переменных, т.е. влияющих факторов. Этого ограничения лишены нечеткие когнитивные карты (НKK) [10] – новое средство моделирования, пока не получившее распространения в теории надежности.

Ниже приводятся основные соотношения НKK и на их основе предлагается метод ранжирования факторов, влияющих на надежность и безопасность системы. Для иллюстрации метода используется система «водитель-автомобиль-дорога».

## 3. Основные понятия и соотношения

### 3.1. Общие замечания

НKK введены Б. Коско [11] как обобщение бинарных когнитивных карт Р. Аксельрода [12], предназначенных для моделирования динамики причинно-следственных связей в социально-политических системах. НKK представляет собой ориентированный граф со взвешенными дугами, пример которого показан на рис. 1. Вершины графа  $C_j$ , называемые *концептами*, соответствуют входным и выходным переменным, которые учитываются в модели. Взвешенные дуги графа отражают *силу влияния*  $w_{ij}$  изменения одной переменной  $C_i$  на изменение другой  $C_j$ .

Термин «когнитивный» говорит о том, что исходными данными для моделирования служат субъективные

мнения эксперта, выраженные словами типа «повышается» или «понижается», например: «повышение  $C_i$  приводит к понижению  $C_j$ ». В бинарных когнитивных картах [12] «повышение» оценивается как «+1», а «понижение» – как «-1».

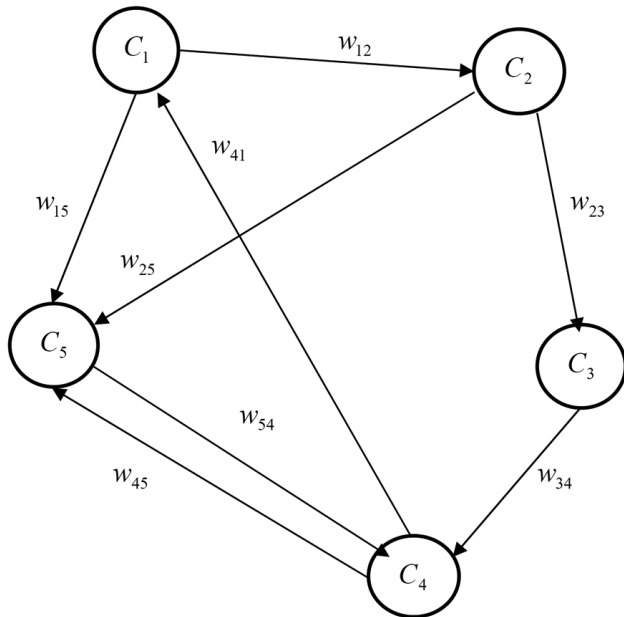


Рисунок 1 – Пример нечеткой когнитивной карты.

Термин «нечеткие» говорит о том, что НКК [11] используют различные уровни «повышения» и «понижения». Они задаются числами из интервалов  $[0, 1]$  и  $[-1, 0]$ , что соответствует термам «слабо», «средне», «сильно» и др. из теории нечетких множеств [10].

С точки зрения теории идентификации [13, 14], которая занимается восстановлением закономерностей по экспериментальным данным, НКК – это аппроксиматор зависимости «входы – выход» с взаимодействующими входами. Как и любой аппроксиматор, например регрессия, нечеткие правила, нейронная сеть и другие, НКК содержит настраиваемые параметры, которые должны оцениваться путем минимизации невязки между модельными и экспериментальными значениями выхода. Если экспериментальные данные «входы – выход» отсутствуют, то качество модели целиком зависит от квалификации

эксперта. Искусство моделирования состоит в том, чтобы компенсировать недостающие экспериментальные данные за счет высокого качества экспертных оценок.

Уместно сопоставить НКК и марковские цепи (процессы), привычные специалистам по надежности. Оба вида моделей – это взвешенные ориентированные графы. В основе отличия НКК от марковских моделей надежности лежит принципиальное различие нечеткой логики (причин) и теории вероятности (следствий), показанное на рис. 2: марковские модели отражают динамику вероятностей состояний системы с учетом отказов и восстановлений; НКК моделируют динамику изменения уровней взаимодействующих факторов, которые являются причинами отказов и влияют на вероятность их возникновения.

### 3.2. Концепты

Пусть  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$  – известное множество концептов, т.е. переменных, используемых в модели. Согласно [11], каждый концепт  $C_i \in C$  оценивается величиной  $A_i \in [0, 1]$ , которая определяет уровень концепта и задается экспертно. Для получения величины  $A_i$  предлагается следующий способ.

Каждый концепт  $C_i \in C$  будем считать лингвистической переменной [10], которая оценивается величиной  $x_i$  на универсальном множестве – интервале  $[x_i, \bar{x}_i]$ , где  $x_i$  ( $\bar{x}_i$ ) – нижняя (верхняя) граница. Для оценки концепта  $C_i \in C$  будем использовать нечеткий терм «перфектность концепта  $C_i$ », который обозначается  $PC_i$  и представляет собой нечеткое множество

$$PC_i = \int_{[x_i, \bar{x}_i]} \pi(x_i)/x_i,$$

где  $\pi(x_i)$  – функция принадлежности переменной  $x_i$  к понятию «перфектность концепта  $C_i$ ». С помощью этой функции каждой абсолютной оценке  $x_i \in [x_i, \bar{x}_i]$  ставится в соответствие число  $A_i = \pi(x_i) \in [0, 1]$ , которое характеризует степень близости значения концепта  $C_i \in C$  к некоторому идеалу: 0 – наименьшая перфектность, 1 – наибольшая перфектность. Синонимом понятия «нечеткая перфектность» является терм «нечеткая правдивость», для которого функции принадлежности рас-

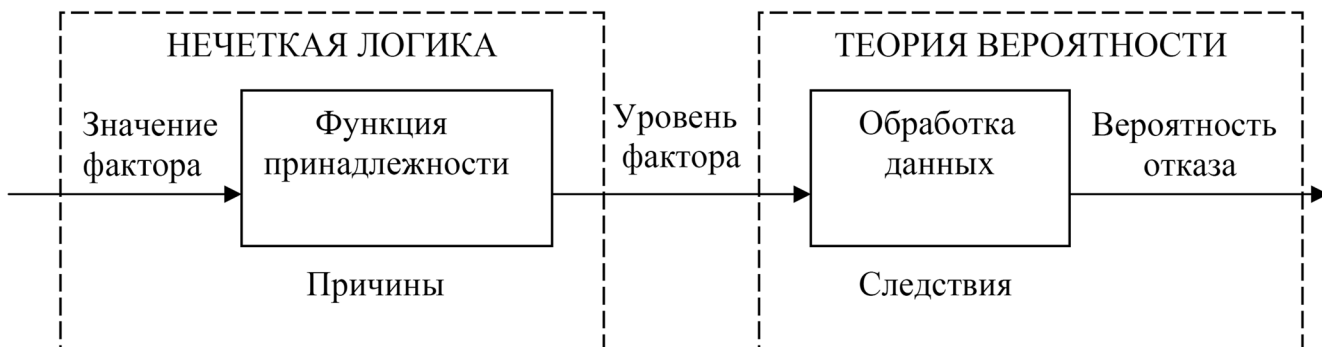


Рисунок 2 – Взаимосвязь теории вероятности и нечеткой логики в оценке надежности.

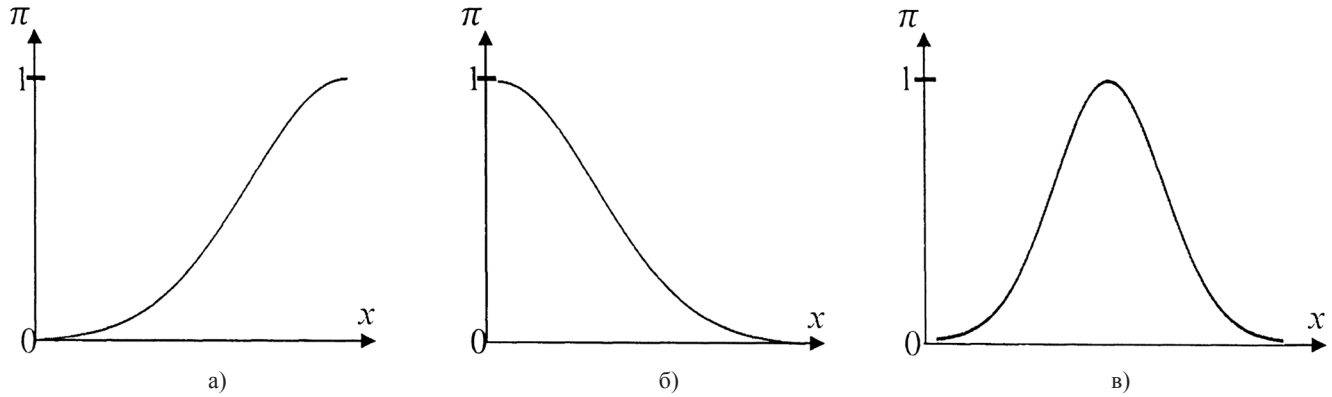


Рисунок 3 – Функции принадлежности для нечеткой перфектности.

смагивались в [15]. Варианты нечетких границ между перфектными и неперфектными значениями переменной  $x$  показаны на рис. 3, где по мере увеличения значения  $x$  происходят следующие переходы:

- а) «неперфектно» (0) – «перфектно» (1),
- б) «перфектно» (1) – «неперфектно» (0),
- в) «неперфектно» (0) – «перфектно» (1) – «неперфектно» (0).

### 3.3. Связи между концептами

Вес  $w_{ij}$  дуги, соединяющей концепты  $C_i$  и  $C_j$ , указывает на силу влияния  $C_i$  на  $C_j$ . Пусть концепты  $C_i$  и  $C_j$  характеризуются переменными  $x_i$  и  $x_j$ , а в результате эксперимента удастся построить зависимость  $x_j = \varphi(x_i)$ . Тогда вес  $w_{ij}$  определяется как производная  $w_{ij} = dx_j/dx_i$ , которая может быть трех видов (рис. 4):

$w_{ij} > 0$ , если повышение (понижение) величины  $x_i$  приводит к повышению (понижению) величины  $x_j$  (положительное влияние  $C_i$  на  $C_j$ );

$w_{ij} < 0$ , если повышение (понижение) величины  $x_i$  приводит к понижению (повышению) величины  $x_j$  (отрицательное влияние  $C_i$  на  $C_j$ );

$w_{ij} = 0$ , если значение  $x_j$  не зависит от значения  $x_i$  (отсутствие влияния  $C_i$  на  $C_j$ ).

Сила влияния ( $w_{ij}$ ) оценивается экспертно с помощью лингвистических термов и шкалы термометра (табл. 1).

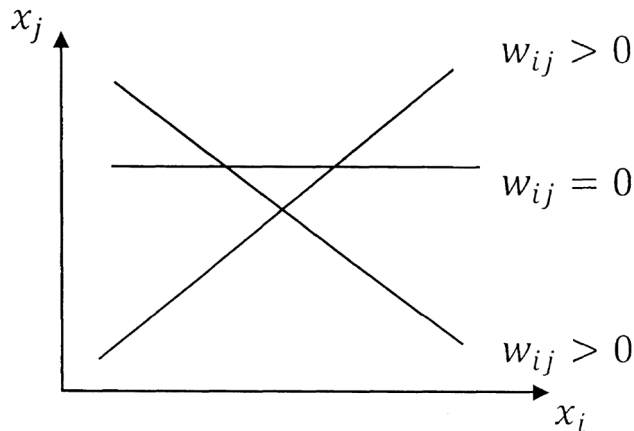


Рисунок 4 – Виды влияний между концептами.

Если учитываются мнения нескольких экспертов, то величина  $w_{ij}$  оценивается как взвешенное среднее:

$$w_{ij} = \frac{\alpha_1 w_{ij}^1 + \alpha_2 w_{ij}^2 + \dots + \alpha_m w_{ij}^m}{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_m},$$

где  $w_{ij}^p$  – оценка силы влияния  $p$ -м экспертом;  $\alpha_p$  – вес  $p$ -го эксперта,  $p = 1, 2, \dots, m$ ;  $m$  – количество экспертов.

Для снижения субъективизма экспертных оценок можно воспользоваться методом наименьшего влияния, предложенным в [16].

Таблица 1 – Способы оценки силы влияния.

Шкала термометра	Лингвистические оценки	Количественные значения
	Положительное максимальное	1
	Положительное выше среднего	0,75
	Положительное среднее	0,5
	Положительное ниже среднего	0,25
	Отсутствует	0
	Отрицательное ниже среднего	-0,25
	Отрицательное среднее	-0,5
	Отрицательное выше среднего	-0,75
	Отрицательное максимальное	-1

### 3.4. Рекуррентные соотношения

Согласно [11, 17], динамика изменения величины концептов в НКК определяется соотношением

$$A_i^{k+1} = f \left( \sum_{j=1, j \neq i}^n A_j^k w_{ji} + c A_i^k \right), k = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

где  $A_i^{k+1}$  – величина концепта  $C_i$  на шаге  $k+1$ ;  $A_i^k$  и  $A_j^k$  – величины концептов  $C_i$  и  $C_j$  на шаге  $k$  соответственно,  $w_{ji}$  – сила влияния концепта  $C_j$  на концепт  $C_i$ ;  $c$  – параметр, учитывающий предысторию, т.е. вклад значения концепта на предыдущем шаге,  $c \in [0, 1]$ ;  $f$  – пороговая функция, благодаря которой величина концепта не превышает единицу.



В этой работе предполагается, что  $c = 1$ , а в качестве пороговой функции используется положительная часть гиперболического тангенса (рис. 5):

$$f(x) = \begin{cases} \tanh(x) & \text{при } x \geq 0; \\ 0 & \text{при } x < 0, \end{cases} \quad \tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}.$$

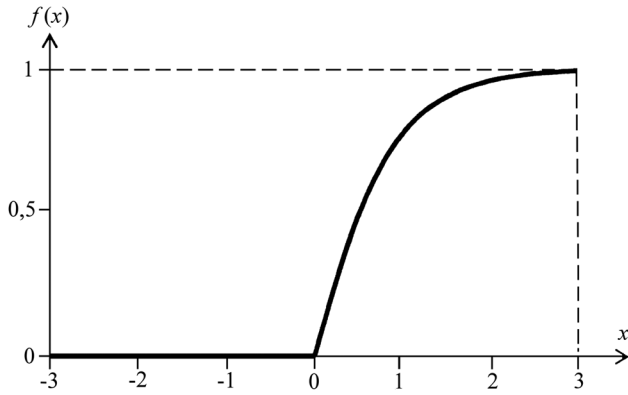


Рисунок 5 – Пороговая функция.

### 3.5. Матричная модель

Рекуррентное соотношение (1) можно представить в матричной форме

$$A^{k+1} = f(A^k W_0 + c A^k), \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (2)$$

где  $A^{k+1}$ ,  $A^k$   $k = 0, 1, 2, \dots$  —  $(1 \times n)$ -векторы состояния НКК, элементы которых задают значения концептов на шагах  $k+1$  и  $k$  соответственно;

$$W_0 = \begin{bmatrix} 0 & w_{12} & \dots & w_{1n} \\ w_{21} & 0 & \dots & w_{2n} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ w_{n1} & w_{n2} & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

—  $(n \times n)$ -матрица сил влияний концептов  $C_i$  друг на друга, в которой диагональные элементы равны нулю.

Если вместо матрицы (3) использовать  $(n \times n)$ -матрицу

$$W = \begin{bmatrix} c & w_{12} & \dots & w_{1n} \\ w_{21} & c & \dots & w_{2n} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ w_{n1} & w_{n2} & \dots & c \end{bmatrix}, \quad (4)$$

в которой все элементы по главной диагонали равны параметру  $c \in [0, 1]$ , то соотношение (2) запишем как

$$A^{k+1} = f(A^k W), \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (5)$$

которое напоминает рекуррентное соотношение для марковской цепи, если принять  $f(x) = x$ . Принципиальное

отличие состоит в том, что марковская цепь моделирует динамику изменения вероятностей событий или события, а НКК моделирует динамику уровня причин, т.е. факторов, приводящих к этим состояниям или событиям (см. рис. 2).

Начальное состояние НКК определяется вектором

$$A^0 = [A_1^0, A_2^0, \dots, A_n^0], \quad (6)$$

элементы которого отражают значения концептов на шаге  $k = 0$ . В результате взаимодействия между концептами НКК входит в стационарный режим, который соответствует одному из видов устойчивости [18].

## 4. Ранжирование концептов

При распределении ресурсов на обеспечение надежности системы используются количественные оценки (ранги) важности ее элементов. В статистической теории надежности наибольшее распространение получил индекс важности элемента по Бирнбауму [1], который определяется на основе функции надежности системы

$$P_s = f_s(P_1, \dots, P_i, \dots), \quad (7)$$

где  $P_s$  и  $P_i$  — вероятность безотказной работы системы и  $i$ -го элемента соответственно.

Первая производная в (7) — индекс важности  $i$ -го элемента системы по Бирнбауму, который вычисляется так [1]:

$$I_i = \frac{\partial P_s}{\partial P_i} = P_s(P_1, \dots, P_{i-1}, 1, P_{i+1}, \dots, P_n) - P_s(P_1, \dots, P_{i-1}, 0, P_{i+1}, \dots, P_n). \quad (8)$$

Вторая производная в (7) — индекс важности совместного влияния  $i$ -го и  $j$ -го элементов (*joint reliability importance*), введенный в [19, 20].

В нашем случае элементами модели являются входные концепты — факторы, влияющие на выходной уровень надежности системы. Поэтому возникает необходимость вычисления индексов важности концептов НКК.

### 4.1. Определение индексов важности

Во множестве концептов  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$  будем предполагать следующее:

$C_n$  — выходной концепт, который определяет уровень надежности системы и оценивается числом  $A_n \in [0, 1]$ ;

$C_1, C_2, \dots, C_{n-1}$  — входные концепты, соответствующие взаимосвязанным факторам, которые влияют на уровень надежности системы и оцениваются уровнями  $A_i \in [0, 1]$ ,  $i = 1, \dots, n-1$ .

Значение концепта  $C_n$  на  $l$ -м шаге является функцией от элементов вектора (6), т.е.

$$A_n^l = F(A_1^0, A_2^0, \dots, A_n^0). \quad (9)$$

Предполагается, что  $A_n^l$  – значение концепта  $C_n$  в стационарном режиме, т.е. на таком шаге  $l$ , когда  $A_n^l$  близко к  $A_n^{l-1}$ . Зависимость (9) является аналогом (7), что позволяет перейти к определению рангов концептов на основе производных.

Пусть  $I(C_j)$  – индекс важности концепта  $C_j$ , а  $I(C_j, C_k)$  – индекс совместной важности концептов  $C_j$  и  $C_k$ . Следуя (8) и [19, 20], определим эти индексы важности так:

$$I(C_j) = \frac{\partial A_n^l}{\partial A_j} = \frac{F(1_j, 0) - F(0)}{1 - 0} = F(1_j, 0), \quad (10)$$

$$I(C_j, C_k) = \frac{\partial^2 A_n^l}{\partial A_j \partial A_k} = \frac{F(1_j, 1_k, 0) - F(0)}{(1 - 0)(1 - 0)} = F(1_j, 1_k, 0), \quad (11)$$

где  $F(1_j, 0)$  – значение функции (9), когда  $A_j^0 = 1$ , а все остальные аргументы равны нулю;  $F(0)$  – значение функции (9), когда все аргументы равны нулю (предполагается, что  $F(0) = 0$ );  $F(1_j, 1_k, 0)$  – значение функции (9), когда  $A_j^0 = A_k^0 = 1$ , а все остальные аргументы равны нулю.

*Замечание.* Нулевые значения входных концептов (кроме одного в (10) и двух в (11), равных единице) выбраны для того, чтобы исключить возможность их влияния на выходной концепт за счет транзитивных связей.

## 4.2. Алгоритм вычисления индексов важности

Шаг 1. Задать начальный вектор (6). Для индекса важности  $I(C_j)$  начальный вектор задается как

$$A^0 = [A_j^0 = 1, A_i^0 = 0, i = 1, 2, \dots, n, i \neq j], \quad (12)$$

а для индекса важности  $I(C_j, C_k)$  в виде

$$A^0 = [A_j^0 = A_k^0 = 1, A_i^0 = 0, i = 1, 2, \dots, n, i \neq j, k]. \quad (13)$$

Шаг 2. Пользуясь рекуррентным соотношением (5) найти вектор состояния НКК

$$A^l = [A_1^l, A_2^l, \dots, A_n^l] \quad (14)$$

в установившемся режиме, т.е. на таком шаге  $l$ , при котором  $|A_i^l - A_i^{l-1}| < \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  – малое положительное число,  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Шаг 3. Индексами важности  $I(C_j)$  и  $I(C_j, C_k)$  считать элементы  $A_n^l$  вектора (14), полученные при начальных векторах (12) и (13) соответственно.

## 5. Пример

### 5.1. Концепты и влияния

Рассмотрим модель надежности и безопасности автомобиля в системе «водитель-автомобиль-дорога».

Нечеткая когнитивная карта системы приведена на рис. 6, где концепты имеют следующее содержание:  $C_1$  – квалификация водителя,  $C_2$  – дорожные условия,  $C_3$  – удельные затраты на эксплуатацию,  $C_4$  – условия эксплуатации,  $C_5$  – периодичность технического обслуживания,  $C_6$  – качество технического обслуживания и ремонта,  $C_7$  – качество конструкции автомобиля,  $C_8$  – качество эксплуатационных материалов и запасных частей,  $C_9$  – условия хранения,  $C_{10}$  – надежность и безопасность автомобиля.

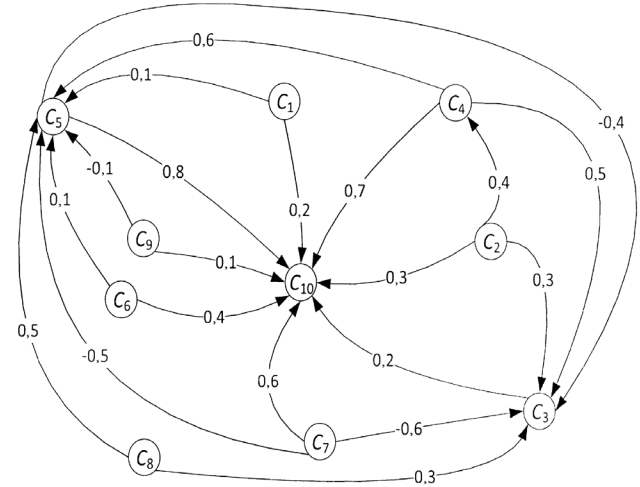


Рисунок 6 – Нечеткая когнитивная карта для оценки надежности и безопасности.

Матрица  $W(4)$  экспертными оценками силы влияний, в которой принималось  $c = 1$ , имеет вид

$$W = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5 \\ 0 & 1 & 0,3 & 0,4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,2 \\ 0 & 0 & 0,5 & 1 & 0,6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,7 \\ 0 & 0 & -0,4 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0,4 \\ 0 & 0 & -0,6 & 0 & -0,5 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0,6 \\ 0 & 0 & 0,3 & 0 & 0,5 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0,1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0,1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

### 5.2. Индексы важности концептов

Табл. 2 содержит девять пар векторов, связанных с вычислением индексов важности концептов  $C_1, \dots, C_9$ . Каждая пара содержит начальный вектор (12) и вектор (14) в установившемся режиме. Последний элемент второго вектора в каждой паре соответствует индексу важности концепта, например  $I(C_1) = 0,686$ . Последний столбец в табл. 2 иллюстрирует пошаговое изменение уровня надежности и безопасности автомобиля ( $A_{10}$ )

Таблица 2 – Значения концептов в стационарном состоянии для различных начальных векторов.

Шаг	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$	$A_7$	$A_8$	$A_9$	$A_{10}$
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
3040	0,022	0,000	0,000	0,000	0,187	0,000	0,000	0,000	0,000	0,68579
1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
774	0,000	0,044	0,000	0,365	0,747	0,000	0,000	0,000	0,000	0,94834
1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
3717	0,000	0,000	0,020	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,22707
1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
3014	0,000	0,000	0,000	0,022	0,335	0,000	0,000	0,000	0,000	0,79115
1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
5324	0,000	0,000	0,000	0,000	0,017	0,000	0,000	0,000	0,000	0,33491
1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
3196	0,000	0,000	0,000	0,000	0,186	0,022	0,000	0,000	0,000	0,68912
1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
4953	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,017	0,000	0,000	0,30912
1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
2742	0,000	0,000	0,000	0,000	0,321	0,000	0,000	0,023	0,000	0,77418
1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
3086	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,022	0,18667

Таблица 3 – Индексы важности совместного влияния факторов.

Концепты	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$	$C_8$	$C_9$
$C_1$	0,949	0,686	0,801	0,686	0,730	0,335	0,786	0,255
$C_2$	—	0,948	0,948	0,948	0,950	0,949	0,950	0,948
$C_3$	—	—	0,791	0,335	0,689	0,309	0,774	0,254
$C_4$	—	—	—	0,791	0,803	0,703	0,823	0,782
$C_5$	—	—	—	—	0,689	0,309	0,774	0,187
$C_6$	—	—	—	—	—	0,356	0,788	0,294
$C_7$	—	—	—	—	—	—	0,309	0,323
$C_8$	—	—	—	—	—	—	—	0,763

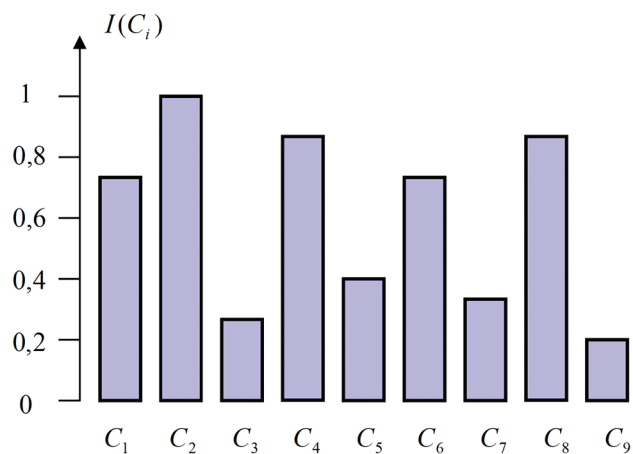


Рисунок 7 – Диаграмма индексов важности факторов.

при активации одного из факторов ( $A_i$ ,  $i = 1, \dots, 9$ ). Диаграмма индексов важности концептов показана на рис. 7. Результаты вычисления индексов важности совместного влияния концептов сведены в табл. 3, например,  $I(C_1, C_2) = 0,949$ .

Следует заметить, что концепт  $C_7$  может быть детализирован с учетом результатов работы [21].

## 6. Заключение

В этой статье предложен и продемонстрирован на примере человеко-машинной системы метод ранжирования факторов, влияющих на ее надежность. В основу метода положена формализация причинно-следственных связей «влияющие факторы – надежность» в виде нечеткой когнитивной карты, т.е. ориентированного графа,

вершины которого соответствуют надежности системы и влияющим факторам, а взвешенные дуги отражают силы влияний факторов друг на друга и на надежность системы.

Предложенный метод можно рассматривать как аналог ранжирования элементов системы по Бирнбауму в вероятностной теории надежности. Достоинствами метода являются:

- использование доступной экспертной информации без сбора и обработки статистических данных;
- возможность учета любых количественных и качественных факторов, связанных с человеком, техникой, программным обеспечением, качеством обслуживания, условиями эксплуатации и др. В частности, отдельными концептами можно характеризовать различные виды избыточности (структурную, алгоритмическую и др.), которые используются для повышения надежности;
- простота расширения числа учитываемых факторов за счет введения новых вершин и дуг ориентированного графа.

Возможными объектами применения метода могут быть сложные системы с нечетко определенной структурой, надежность которых сильно зависит от взаимосвязанных факторов, измеряемых экспертно.

## Библиографический список

1. Барлоу Р. Статистическая теория надежности испытания на безотказность [Текст] / Р. Барлоу, Ф. Прошан. – М.: Наука, 1984.
2. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем [Текст] / И.А. Рябинин. – СПб: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2007.
3. Губинский, А.И. Эргономическое проектирование судовых систем управления [Текст] / А.И. Губинский, В.Г. Евграфов. – Ленинград: Судостроение, 1977.
4. Губинский А.И. Надежность и качество функционирования эргатических систем [Текст] / А.И. Губинский. – Ленинград: Наука, 1982.
5. Глушков В.М. Алгебра. Языки. Программирование [Текст] / В.М. Глушков, Г.Е. Цейтлин, Е.Л. Ющенко. – Киев: Наукова Думка, 1978.
6. Ротштейн А.П. Вероятностно-алгоритмические модели человеко-машинных систем [Текст] / А.П. Ротштейн // Автоматика. – 1987. – №6. – С. 81-87.
7. Ротштейн А.П. Нечеткий анализ надежности алгоритмов деятельности [Текст] / А.П. Ротштейн // Надежность. – 2007. – №2. – С. 3-18.
8. Barnard A. Why you cannot predict electronic product reliability [Текст] / A. Barnard. – ARS, Europe: Warsaw, Poland, 2012.
9. Горяинов А.А. Анализ влияний факторов на ущерб от происшествий на транспорте с помощью регрессионных моделей [Текст] / А.А. Горяинов, А.М. Замышляев, Е.Н. Платонов // Надежность. – 2013. – №2. – С. 126-144.
10. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений [Текст] / Л. Заде. – М.: Мир, 1976.
11. Kosko B. Fuzzy cognitive maps [Text] / B. Kosko // International Journal of Man-Machine Studies. – 1986. – Vol. 24. – P. 65-75.
12. Axelrod R. Structure of Decision: The Cognitive Maps of Political Elites [Text] / R. Axelrod. – Princeton: University Press, 1976.
13. Цыпкин Я.З. Основы информационной теории идентификации [Текст] / Я.З. Цыпкин. – М.: Наука, 1984.
14. Rotshtein A. Fuzzy Evidence in Identification, Forecasting and Diagnosis [Text] / A. Rotshtein, H. Rakytyanska. – Berlin: Springer, 2012.
15. Ротштейн А.П. Выбор условий деятельности человека на основе нечеткой перфектности [Текст] / А.П. Ротштейн // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 2018. – № 6. – С. 108-119.
16. Ротштейн А.П. Ранжирование элементов системы на основе нечетких отношений: метод нечеткого влияния [Текст] / А.П. Ротштейн // Надежность. – 2015. – № 4. – С. 16-29.
17. Kosko B. Neural Network and Fuzzy Systems. Englewood Cliff [Text] / B. Kosko. – N.Y.: Prentice-Hall, 1992.
18. Бутенин Н.В. Введение в теорию нелинейных колебаний [Текст] / Н.В. Бутенин, Ю.И. Неймарк, Н.А. Фуфаев. – М.: Наука, 1987.
19. Hong J.S. Joint Reliability Importance of two Edges in undirected Network [Text] / J.S. Hong, C.H. Lie // IEEE Transaction on Reliability. – 1993. – Vol. 2. – № 1. – P. 17-23.
20. Gertsbakh I. Combinatorial Approach to Computing Component Importance Indexes in Coherent Systems [Text] / I. Gertsbakh, Y. Shpungin // Probability in the Engineering and Information Sciences. Cambridge University Press. – 2012. – Vol. 24(1). – P. 1-10.
21. Нетес В.А. Исследование эксплуатационной надежности систем автомобиля LADA KALINA, влияющих на безопасность дорожного движения [Текст] / В.А. Нетес // Надежность. – 2017. – № 4. – С. 31-35.

## Сведения об авторе

**Александр П. Ротштейн** – доктор технических наук, профессор, профессор Иерусалимского политехнического института – Махон Лев, Иерусалим, Израиль; Донецкий национальный университет им. В.Стуса, Винница, Украина, e-mail: rothstei@jct.ac.il