

# РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ КОНЦЕПТУАЛЬНЫХ ОСНОВ АВТОМАТИЗАЦИИ ЭКСПЕРТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ХОДЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Д. М. Ненадович

ОАО «Корпорация специальных космических систем «Комета» (г. Москва)

Поступила в редакцию 21.10.2017 г.

**Аннотация.** В статье представлены результаты разработки концептуальных основ создания телекоммуникационных экспертных систем, позволяющих существенным образом повысить степень объективности формирования экспертных оценок качества проектно-технических решений, принимаемых в ходе проектирования телекоммуникационных систем. Предложенные подходы к автоматизации экспертной деятельности, позволяют учесть различие в степени априорной неопределённости исходной информации, присущие каждому этапу проектирования.

**Ключевые слова:** телекоммуникационные системы, телекоммуникационные экспертные системы, проектно-технические решения, экспертные показатели качества.

**Annotation.** The article presents the results of the development of conceptual bases of creation of telecommunication expert systems that allow significantly improve the level of objectivity of forming expert quality estimates of design and technical decisions made during the design of telecommunication systems. Proposed approaches to automation of expert activity can take into account differences in the degree of a-prior uncertainty of the initial information specific to each design phase.

**Keywords:** telecommunication systems, telecommunication expert systems, project and technical decisions, expert quality estimates.

## ВСТУПИТЕЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В настоящее время, разработка перспективных телекоммуникационных систем (ТКС) осуществляется, как правило, на основе выбора и функционального согласования того или иного перечня телекоммуникационного оборудования зарубежных производителей. В этих условиях деятельность Заказчика в ходе проектирования ТКС сводится по существу к неким формам контроля за ходом разработки ТКС, как правило, в моменты принятия стратегических проектно-технических решений (ПТР) по построению систем. При этом индикаторами качества ПТР выступают значения экспертных показателей качества (ЭПК) функционирования ТКС, при реализации в системе того или иного решения. В зависимо-

сти от сложности моделируемых процессов, из ЭПК могут быть сформированы системы (ЭСПК), содержащие различное количество ЭПК. В этих условиях, резко возрастает значение интеллектуализации экспертной деятельности Заказчика в ходе проектирования ТКС, что обуславливает необходимость повышения степени автоматизации процесса принятия экспертных решений [1].

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Автоматизации экспертной деятельности выглядит наиболее целесообразной на основе разработки телекоммуникационной экспертной системы (ТКЭС) – интеллектуальной системы, осуществляющей информационную поддержку процесса формирования экспертных оценок качества ПТР, принимаемых в ходе проектирования телекоммуникационных си-

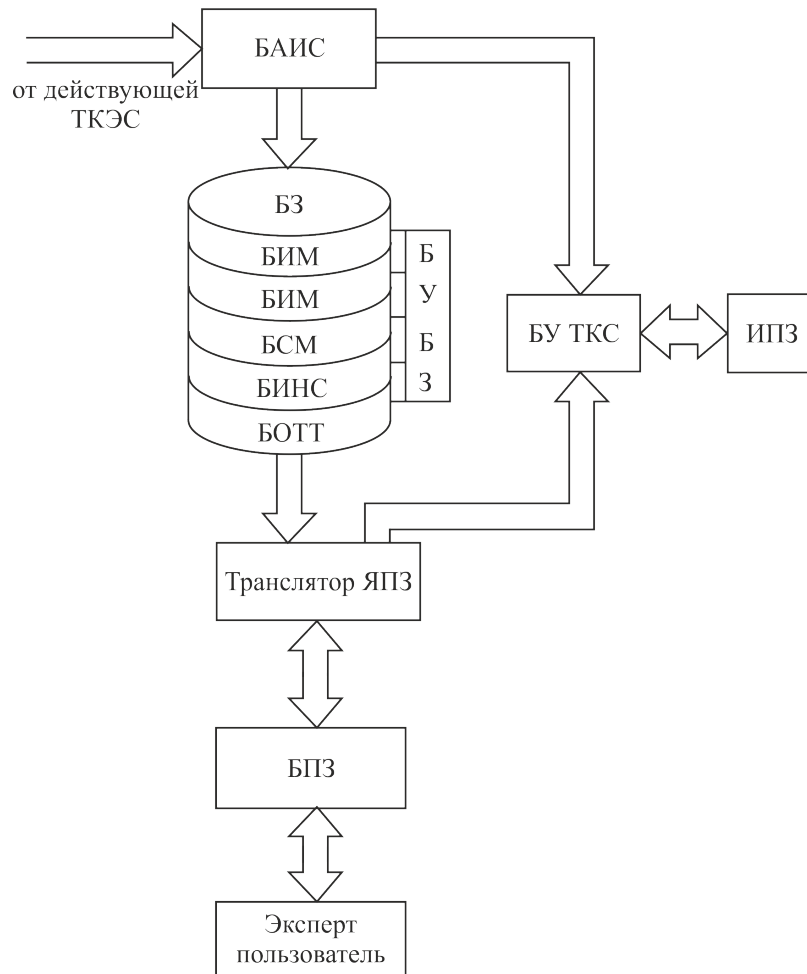


Рис. 1. Вариант структурной схемы ТКЭС с централизацией знаний

стем на основе реализации программы-модели процесса мышления эксперта и анализа данных специализированной базы знаний и данных, полученных в ходе вероятностного, нечеткого и генетического моделирования, а так же данных, полученных из системы-аналога [2]. Один из вариантов общей структурной схемы ТКЭС представлены на рис. 1.

Основными элементами схемы являются блок экспертных знаний (БЭЗ), блок стохастических моделей (БСМ), блок имитационных моделей (БИМ), блок нечетких моделей (БНМ), блок искусственных нейронных сетей (БИНС), блок анализа информации поступающей из действующей системы (опытного участка ТКЭС) (БА ИДС), блок оптимизации технических требований (БОТТ), блок управления ТКЭС (БУ), блок представления знаний (БПЗ), интерпретатор знаний (ИПЗ).

Учитывая, что содержание БЭЗ, БА ИДС, БУ, БПЗ, ИПЗ, составляет информация опреде-

ляющая функционирование ТКЭС, подлежащая отдельному рассмотрению, а структурные схемы БСМ и БИМ подробно рассмотрены в [2], остановимся на рассмотрении технической реализации БНМ, БИНС и БОТТ.

Основу содержания БНМ составляет нечёткая модель процесса функционирования ТКЭС и результаты её реализации. Структурная схема формирующего фильтра нечеткой последовательности (ФФНП) представлена на рис. 2. Представленный вариант реализации ФФНП аппаратно реализует следующее уравнение для вектора индикаторов состояния (изменения значений ЭПК):

$$\bar{\theta}(k+1) = \Pi^T(k+1, k, r)\bar{\theta}(k) + \Delta\bar{\theta}(k+1); \quad (1)$$

где  $\theta$  – значения вектора индикаторов состояния моделируемых последовательностей:

$$\begin{cases} \bar{\theta}_m = 1 \text{ при } \eta(k) = \eta_m, m = 1, \dots, M, \\ \mathbf{0} \text{ в остальных случаях;} \end{cases}$$

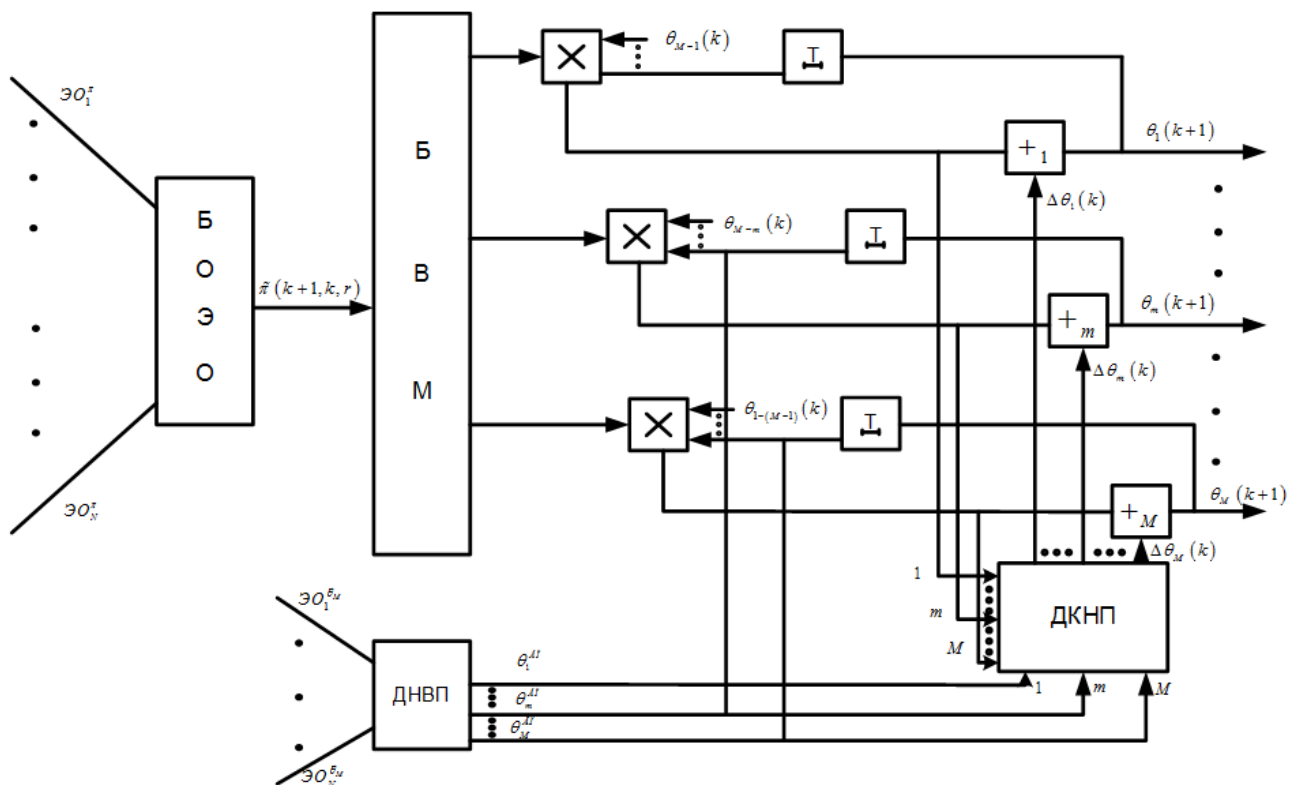


Рис. 2. Структурная схема формирующего фильтра нечеткой последовательности (ФФНП)

$C(k)$  –  $M$ -мерная матрица-строка возможных состояний процесса изменения значений ЭПК  $\eta(k)$ ;  $\Pi(k+1, k, r(k))$  – матрица одношаговых переходных вероятностей (ОПВ), значения элементов которой зависят от принятых ПТР  $r(k)$  и определяемая в соответствии с соотношениями  $\Pi_{ml}(k+1, k, r(x)) = q_{ml}T$ ,  $\Pi_{mm} = q_{mm}T + 1$ ,  $T$  – период изменения состояния;  $\Delta\theta(k+1)$  – вектор компенсации нецелочисленных значений индикаторов, значения которого формируются датчиком коррекции нечеткой последовательности (ДКНП), структурная схема датчика представлена на рис. 3. Значения вектора компенсации нецелочисленных значений индикаторов формируются в соответствии с правилом:

$$\Delta\bar{\theta}(k+1) = \Delta\theta(k+1)\bar{\theta}^{ВП}(k); \quad (2)$$

$$\Delta\theta(k+1) = I - \langle [\Pi^T(k+1, k, r)\bar{\theta}(k)] \rangle_M; \quad (3)$$

где  $\Delta\theta(k+1)$  –  $M$ -мерная матрица компенсационных добавок,  $\bar{\theta}^{ВП}(k)$  – вектор вспомогательной последовательности, формируемый на основе экспертного оценивания,  $I$  –  $M$ -мерная диагональная единичная матрица,  $\langle \bullet \rangle_M$  –  $M$ -мерная матрица, столбцами которой явля-

ются  $M$  одинаковых векторов нецелочисленных значений индикаторов.

Отдельно следует остановиться на формировании значений элементов матрицы ОПВ в блоке объединения экспертных оценок (БОЭО), структурная схема блока представлена на рис. 4. В рассматриваемом случае, подразумеваемом нечеткое моделирование процесса изменения состояний ТКС (значений ЭПК) при реализации в системе различных ПТР, значения элементов матрицы ОПВ могут быть определены на основе объединения множеств экспертных оценок. В качестве механизма интеграции экспертных оценок, с целью наиболее полного учета мнений каждого эксперта, может быть реализована операция дизъюнктивного суммирования [3]. В терминах теории нечетких множеств дизъюнктивная сумма, например, двух множеств ( $\varepsilon O_1$  и  $\varepsilon O_2$ ) экспертных оценок значений элементов матрицы ОПВ, сформированных разными экспертами, может быть представлена в следующем виде:

$$\varepsilon O_1 \oplus \varepsilon O_2 = (\varepsilon O_1 \cap \bar{\varepsilon O}_2) \cup (\bar{\varepsilon O}_1 \cap \varepsilon O_2); \quad (4)$$

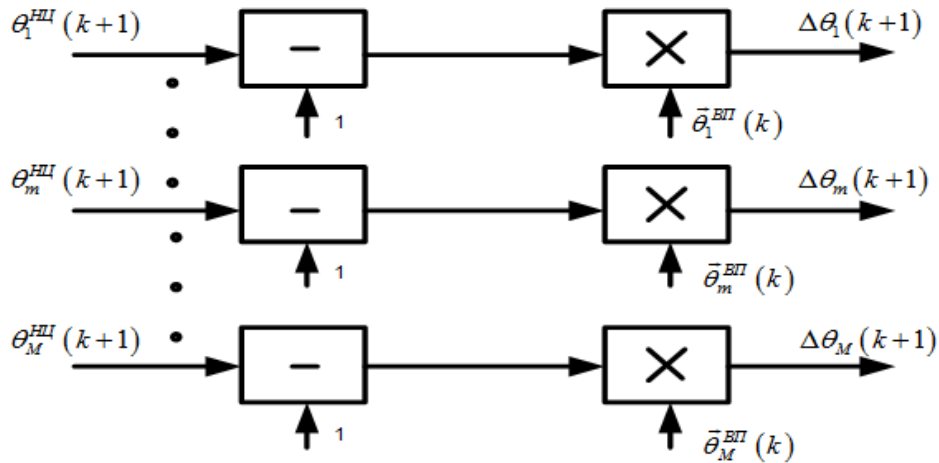


Рис. 3. Структурная схема датчика коррекции нечеткой последовательности (ДКНП)

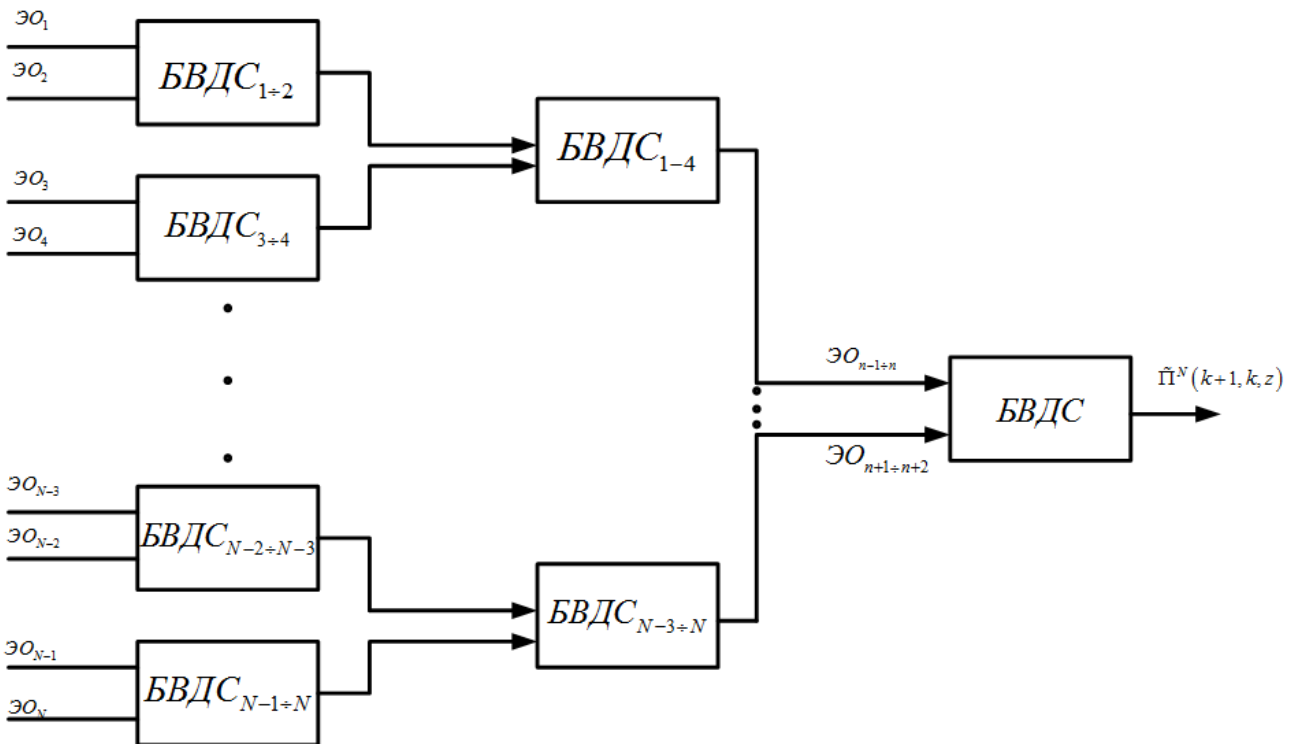


Рис. 4. Структурная схема блока определения экспертных оценок (БОЭО)

где  $\bar{\mathcal{E}O}_1$  и  $\bar{\mathcal{E}O}_2$  – дополнения соответствующих нечетких множеств.

В этом случае функция принадлежности имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \mu_{\mathcal{E}O_1 \oplus \mathcal{E}O_2}(\Pi) &= \\ &= \max \left\{ (\min[\mu_{\mathcal{E}O_1}(\Pi), 1 - \mu_{\mathcal{E}O_2}(\Pi)], \right. \\ &\quad \left. (\min(1 - \mu_{\mathcal{E}O_1}(\Pi); \mu_{\mathcal{E}O_2}(\Pi))) \right\}; \end{aligned} \quad (5)$$

Структурная схема блока вычисления дизъюнктивной суммы (БВДС) аппаратно реализующего выражения (4)–(5) представлена на рис 5.

Основу содержания БИНС, составляют ИНС, адаптированные для решения задач в рассматриваемой постановке [1, 4, 5]. Формирование экспертных оценок технических решений на ранних стадиях проектирования ТКС сильно осложнено «размытостью» облика разрабатываемой системы и, как следствие, неполнотой, а зачастую и противоречивостью информации о предполагаемой архитектуре, топологии, алгоритмах функционирования системы и т. д.

В этих условиях задача формирования экспертных оценок качества технических ре-

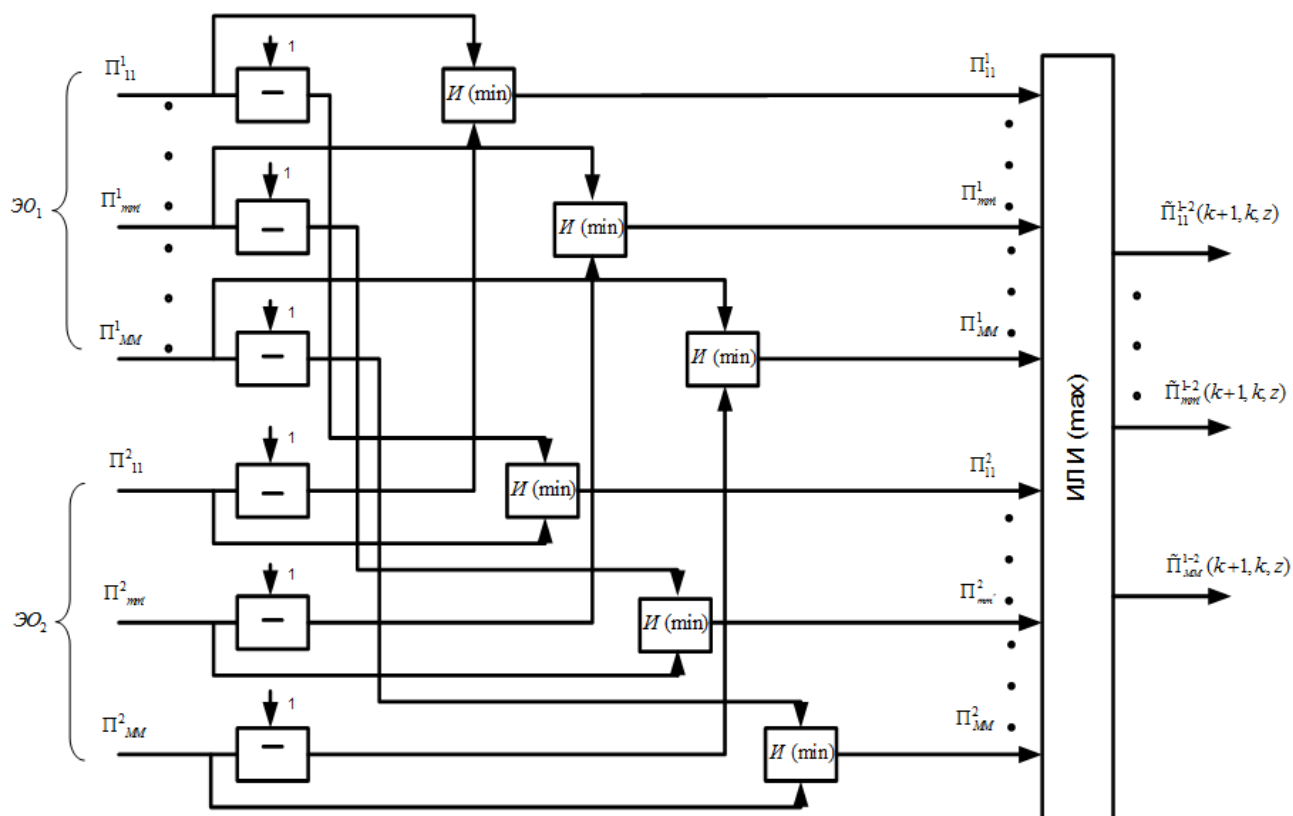


Рис. 5. Блок вычисления дизъюнктивной суммы (БДС) экспертных оценок

шений, принимаемых разработчиком на различных этапах проектирования ТКС может быть математически корректно решена на основе вычислительных моделей нового класса, позволяющих принимать решение в условиях неопределенности с учетом суждений большого количества экспертов. К относительно новым вычислительными моделям относятся искусственные нейронные сети, нашедшие применение в различных областях принятия решений в условиях неопределенности.

Для решения задач в рассматриваемой постановке особенный интерес представляет анализ применимости используемых в ИНС принципов обработки информации с целью создания уникальных экспертных алгоритмов, реализация которых в ТКЭС позволила бы формировать экспертные оценки качества технических решений, принимаемых в ходе проектирования ТКС в условиях неполноты (нечеткости) исходной информации.

Анализ многочисленных публикаций [1], посвященных рассмотрению ИНС различной структуры (полносвязные, многослойные (монотонные, с обратными связями, без об-

ратных связей), слабосвязные) и основанных на различных концептуальных принципах (модели ассоциативной памяти, перцептроны, когнитроны, сети встречного распространения, Хопфилда, Хемминга, адаптивные резонансные и всевозможные их комбинации при различных методах обучения), позволяет сделать вывод о перспективности реализации в ТКЭС искусственных нейронных сетей, главным образом, для решения задач прогнозирования. Этому способствует тот факт, что по своей сути ИНС являются аппроксиматорами и способны формировать прогнозный выходной сигнал на абсолютно неизвестное им входное воздействие.

Рассмотрим один из вариантов построения алгоритма формирования экспертных оценок, на основе реализации синхронной сети Хопфилда с использованием когнитивных карт [4, 5]. Как известно, под когнитивной картой понимается ориентированный граф, узлы которого представляют собой некоторые объекты или концепты (в нашем случае – проектные решения), а дуги – связи между ними, характеризующие причин-



но-следственные отношения. Тот факт, что причинная связь является более общим понятием, чем, например, логическая связь, позволяет надеяться на более полное отражение взаимосвязей между совокупностью разноразрядных технических решений. Эти связи могут быть положительными и отрицательными. Если увеличение (уменьшение) веса (значимости, предпочтительности) одного решения приводит к увеличению (уменьшению) значимости, важности, предпочтительности другого решения, то причинная связь между ними положительна, и наоборот. Отсутствие причинных связей между некоторыми решениями объективно закономерно и учитывается в когнитивной карте, как нуль. Вариант представления неполных и противоречивых знаний о причинных связях различных решений в виде когнитивной карты, представлен на рис. 6.

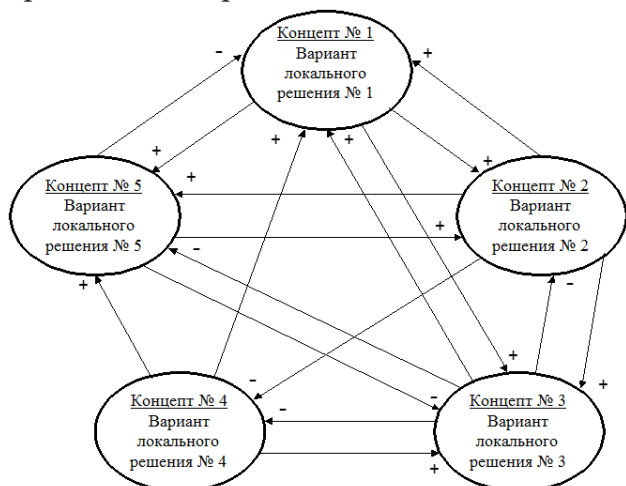


Рис. 6. Вариант представления неполных и противоречивых знаний в виде когнитивной карты

На рисунке изображена когнитивная карта для 5 (пяти) концепт, характеризующая причинно-следственные зависимости между некоторыми условными вариантами локальных (частных) проектных решений, являющихся элементами общего решения: концепт № 1 – вариант локального (частного) решения № 1; концепт № 2 – вариант локального (частного) решения № 2; концепт № 3 – вариант локального (частного) решения № 3; концепт № 4 – вариант локального (частного) решения № 4 и концепт № 5 – вариант локального (частного) решения № 5.

Когнитивная карта, представленная на рис. 9, полностью задается своей матрицей связей, которая имеет вид:

$$W = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Нетрудно видеть, что когнитивная карта соответствует условиям сходимости Кохена и Гросберга [7]. Составление подобных карт является одной из важных задач экспертов телекоммуникационных проектов. Задача состоит в установлении множества взаимосвязанных локальных проектных решений (концепт), входящих в состав общего решения по построению перспективной ТКС, и определение характера связей между этими концептами. Когнитивные карты позволяют естественным образом объединить неполные и противоречивые мнения нескольких экспертов для более адекватного описания данного процесса. Достоинством данного метода является возможность обобщения неполных и противоречивых знаний различных экспертов в итоговой когнитивной карте, которая учитывает мнения всех привлеченных специалистов и служит основой для формирования прогноза значимости и совместимости тех или иных технических решений на различных этапах жизненного цикла ТКС.

Рассмотрим пример функционирования ЭИНС на примере когнитивной карты, изображенной на рис. 6 и характеризуемой матрицей  $W$  весов (6).

Допустим, нас интересует получение прогноза для случая экспертной оценки целесообразности реализации того или иного технического решения в ТКС наилучшим образом дополняющего сформированное на предыдущих этапах основное решение, характеризуемое концептом № 3. В процессе функционирования ЭИНС должна реконструировать недостающие компоненты общего итогового решения (выдать рекомендации для включения в состав общего решения ряда локальных решений).

В рассматриваемом случае входной вектор нейронной сети может быть представлен в виде:  $\vec{C} = [0, 0, 1, 0, 0]$ . В соответствии с рассмотренным ранее алгоритмом выходной вектор  $\vec{B} = [b_1, b_2, \dots, b_5]$  последовательно принимает ряд значений, которые определяются на основе выражения

$$b_i(t+1) = f\left(\sum_{j=1}^n a_j(t) \cdot w_{ij}\right) = f\left(\sum_{j=1}^n b_j(t) \cdot w_{ij}\right) \quad (7)$$

и записывается в виде:

$$\begin{aligned} \vec{B}(1) &= f([1, -1, 0, -1, -1]) = [1, -1, 1, -1, -1]; \\ \vec{B}(2) &= f([0, -1, 0, 0, -2]) = [0, -1, 1, 0, -1]; \\ &\vdots \\ \vec{B}(10) &= f([1, -1, 1, 0, -1]) = [1, -1, 1, 0, -1]. \end{aligned} \quad (8)$$

Графически зависимость веса концепт от шага вычисления новых состояний нейронов выходного слоя представлены в виде пошаговой диаграммы, представленной на рис. 7. Как видно из графиков рис. 7 экстраполирующая ИНС стабилизировалась уже после третьего такта. Состояние экстраполирующей сети, характеризуется снижением влияния концепта № 2 (частное техническое решение № 2), концепта № 5 (частное техническое решение № 5) и увеличением веса концепта № 1 (частное техническое решение № 1) при условии, что техническое решение, соответствующее концепту № 3, является принятым. Результаты решения задачи, приведенной в качестве примера, позволяют с высокой степенью объективности и обоснованности, опираясь на мнения эксперта (группы экспертов), принимавших участие в составлении когнитивной карты, сформировать полное и непротиворечивое общее основу общего решения гарантированно составят варианты технических решений, описываемые с помощью концепт № 1 и № 3. Варианты технических решений, описываемых с помощью концепт № 2 и № 5 не войдут в итоговое решение, а в отношении концепта № 4 конкретное решение может быть вынесено повторной реализацией рассмотренной процедуры при составлении когнитивной карты на три концепта. Таким образом, рассмотренный подход к формированию экспертной оценки целесообразности реализации конкретных технических реше-

ний на ранней стадии проектирования ТКС, позволяет существенно снизить степень неполноты и противоречивости исходных данных при формировании решения определяющего облик системы.

Отдельного внимания заслуживают нечеткие искусственные нейронные сети (НИНС), в которых выводы делаются на основе аппарата нечеткой логики с подстрой-

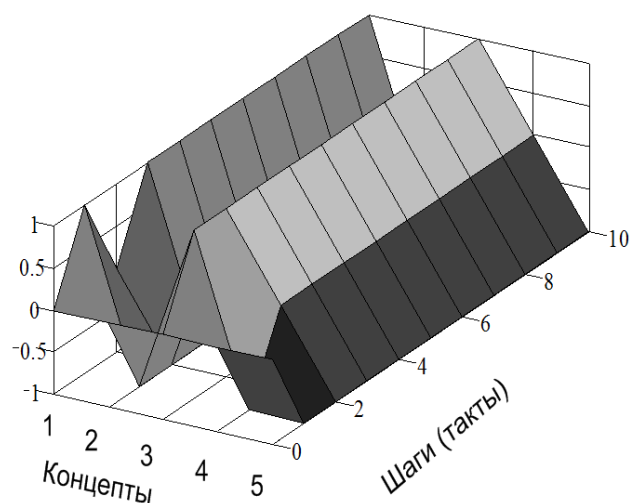


Рис. 7. График зависимости веса концепт от шага вычисления новых состояний нейронов выходного слоя

кой функций принадлежности с использованием алгоритмов обучения нейронных сетей. При этом чаще всего используется алгоритм с обратным распространением ошибок [5]. Иными словами, для трансформации ИНС в НИНС необходимо произвести замену операций умножения, суммирования и активации на операции с  $t$ -нормами и  $s$ -конормами (функциями двух действительных переменных  $(x, y)$ , определенных на интервалах  $0 \leq x \leq 1$ ,  $0 \leq y \leq 1$  и принимающих значения  $0 \leq t(x, y) \leq 1$ ,  $0 \leq s(x, y) \leq 1$ ). На основе разработки НИНС, в настоящее время, предпринимаются попытки преодолеть разрыв между бионическим интеллектом ИНС и интеллектом систем логического вывода (напомним, что универсальность аппроксимирующих свойств отдельных систем нечеткого вывода доказана У. Вангом и К. Кастро). В случае реализации в НИНС генетических алгоритмов обучения возможно достижение синергетического эффекта свойств каждого из трех компонентов, на основе, так называемой [6], «мягкой» вычислительной системы.

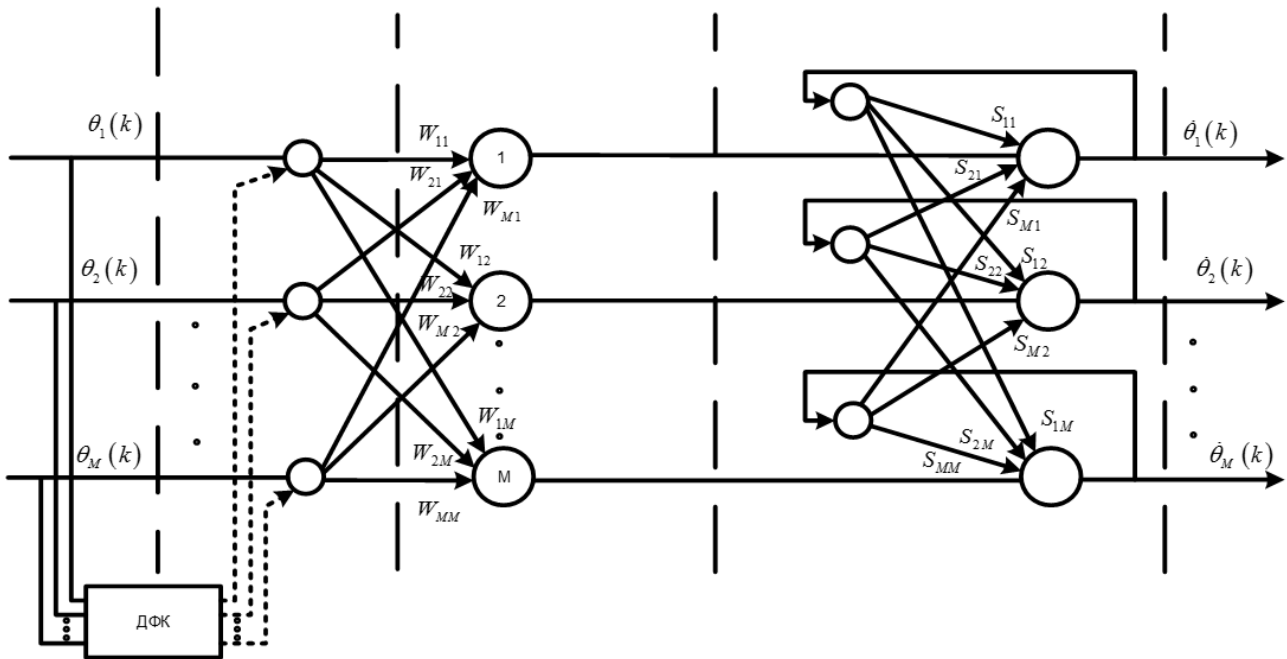


Рис. 8. Структурная схема искусственной нейронной сети Хемминга с обучением на основе ДФК

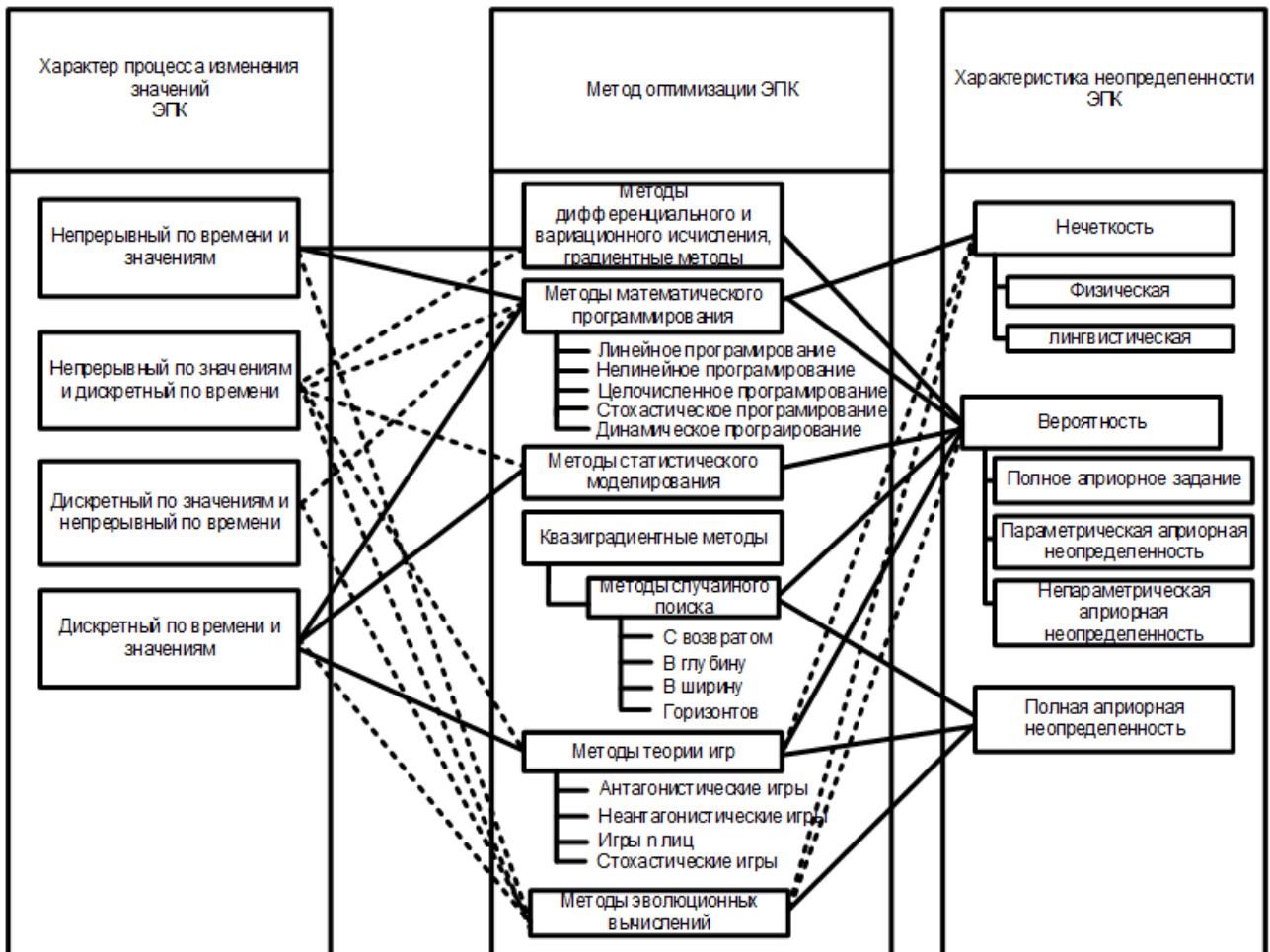


Рис. 9. Взаимосвязь методов оптимизации с характером процесса изменения ЭПК и априорной неопределенности



Вместе с тем, для решения задач в рассматриваемой постановке, большой интерес представляет анализ результатов моделирования процесса функционирования ТКС (изменения ЭПК), полученных на основе реализации ИНС Хеминга (ИНСХ), хорошо зарекомендовавшей себя при решении задач воссоздания образов векторов по неполной и искаженной информации. ИНСХ с устройством подстройки синаптических весов входного слоя на основе дискретного фильтра Калмана [2], представлена на рис. 8. При этом, предлагаемый вариант ИНС Хеминга минимизирует хемингово расстояние между входными и эталонными образами векторов и работает следующим образом: на нейроны входного слоя подаются элементы вектора индикаторов состояния ТКС (значений ЭПК), значения которых «взвешиваются» с коэффициентами равными обратной величине «невязок наблюдения» ( $1/\xi$ ). поступающими из ДФК. В результате, на выходах нейронов входного слоя формируются следующие значения:

$$\theta_m^{ex}(k) = \sum_1^M \theta_m(1/\xi_m). \quad (9)$$

Далее ИНСХ функционирует в соответствии с разработанным для сети алгоритмом, формируя на выходах нейронов выходного слоя значения элементов вектора  $\bar{\theta}(k)$  в соответствии с пороговой функцией активации, отрицательными ( $S_{12} \dots S_{mM}$ ) и положительными ( $S_{mm}$ ) обратными связями.

Реализация в ИНСХ обучающей процедуры на основе ДКФ позволит существенно (практически на порядок [5]) увеличить скорость сходимости сети и повысить точность получаемых результатов при несущественном увеличении вычислительных затрат.

Основу содержания БОТТ, составляют методы оптимизации технических требований, представленные во взаимосвязи с характером изменения ЭПК и уровнем априорной неопределенности на рис. 9.

**Ненадович Д. М.** – д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник, ОАО «Корпорация специальных космических систем «Комета», г. Москва

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, реализация в ТКЭС рассмотренных методов позволит добиться существенного снижения степени субъективности оценки качества системообразующих проектно-технических решений, принимаемых на различных этапах построения ТКС, характеризующихся различным характером и степенью априорной неопределенности информации, являющейся исходной для проектирования сложных технических систем.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ненадович Д. М.* Методологические аспекты экспертизы телекоммуникационных проектов. – М. Горячая линия – Телеком, 2008. – 272.
2. *Ненадович Д. М.* Концептуальные основы автоматизации экспертной деятельности в ходе проектирования сложных телекоммуникационных систем // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. Системный анализ и информационные технологии. – 2017. – № 3. – С. 165–173.
3. Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения: Пер. с англ. / Под ред. Р. Р. Ягера. – М. : Радио и связь, 1986. – 408 с.
4. *Терентьев В. М., Паращук И. Б.* Теоретические основы управления сетями многоканальной радиосвязи. – СПб. : ВАС, 1995. – 195 с.
5. *Круглов В. В., Борисов В. В.* Искусственные нейронные сети. Теория и практика. 2-е издание. – М. : Горячая линия-Телеком, 2002. – 382 с.
6. *Ярушкина Н. Г.* Основы теории нечетких и гибридных систем. – М. : Финансы и статистика, 2004. – 320 с.

**Nenadovich D. M.** – Dr. of Tech. sciences, leading Researcher, «Corporation special space systems «Comet», Moscow