

# Нечёткие когнитивные модели как основа для исследования сложных систем и процессов

**Борисов Вадим Владимирович,**  
доктор технических наук, профессор кафедры ВТ Филиала ФГБОУ  
ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
в г. Смоленске, e-mail: vbor67@mail.ru

## Аннотация

Представлены подходы к использованию нечётких когнитивных моделей для исследования сложных систем и процессов. Как правило, нечёткие когнитивные модели применяются для предварительного анализа сложных систем и проблемных ситуаций, результаты которого используются для последующего углубленного исследования. Другой подход заключается в замене отдельных компонентов нечётких когнитивных моделей компонентами других моделей для расширения возможностей и улучшения свойств. Третий подход основан на построении композиционных гибридных нечётких моделей, в которых отдельные нечёткие модели используются относительно независимо и выполняют различные задачи по достижению общей цели.

**Ключевые слова:** сложная система, нечёткая когнитивная модель, композиционная гибридная модель.

## ВВЕДЕНИЕ

Проблемы исследования сложных систем и процессов во многом определяются следующими факторами:

- разнородность составляющих их объектов и компонентов, многообразие и разнотипность связей и взаимозависимостей между ними, которые не поддаются точному и детализированному описанию; поэтому их, как правило, невозможно формализованно представить и проанализировать в рамках единой модели;
- неясность выделения «границ» системы, её состояний, проблемных ситуаций;

- получение приемлемого уровня информации для построения «точных» моделей является трудоемкой, дорогостоящей или нерешаемой задачей;
- значимая доля информации доступна либо в качестве экспертных данных, либо в эвристическом виде, и её, как правило, недостаточно для представления аналитических зависимостей;
- оценка системных параметров выполняется с использованием различных измерительных и оценочных шкал;
- традиционные модели не позволяют учесть все типы неопределенности [1-3].

Нечёткие когнитивные модели и методы создает основу для разрешения обозначенных выше проблем за счет следующих особенностей:

- представление многообразных и разнотипных связей и взаимозависимостей между объектами и компонентами системы в виде нечётких отношений взаимовлияния обеспечивает возможность применения единого подхода к их предварительному анализу с использованием методов нечёткой каузальной алгебры;
- формализация и анализ не только системы, но и отдельных проблемных ситуаций с обеспечением требуемого уровня достоверности моделирования;
- совместное использование неоднородной информации: количественной, качественно-количественной и качественно представленной (детерминированной, статистической, лингвистической, интервальной, нечёткой) информации, измеряемой и оцениваемой с использованием различных шкал;
- единая форма представления значений системных параметров, внешних факторов, целевых функций и ограничений за счет их нечёткой грануляции, позволяющая реализовать единообразный подход к их обработке и анализу;
- учёт не только непосредственного, но и опосредованного, а также агрегированного взаимовлияния различных системных и внешних факторов друг на друга и обеспечение, таким образом, свойства эмерджентности моделируемой системы/процесса/проблемной ситуации;
- наглядность и хорошие интерпретационные свойства процесса и промежуточных/итоговых результатов нечёткого когнитивного моделирования;
- адекватный учёт различных типов неопределенности (стохастической, статистической, нестохастической) в рамках единой модели [4-9].

Вместе с тем существующие методы и модели нечёткого когнитивного моделирования, как правило, ограничиваются решением задач предварительного анализа сложных систем и процессов, к которым можно отнести: формализацию проблемных ситуаций; анализ отношений взаимовлияния системных и внешних факторов; оценку системных характеристик (консонанса, диссонанса, влияния и других); анализ устойчивости системы; прогнозную оценку состояния систем; моделирование системной динамики [2].

В настоящее время предпринимаются усилия по приданию методам нечёткого когнитивного моделирования дополнительных возможностей за счет их интеграции с другими методами и моделями.

В статье приведено обоснование и рассмотрены примеры использования трех различных подходов к расширению возможностей нечётких когнитивных моделей и основанных на них методов для анализа сложных систем и процессов.

Первый подход заключается в использовании нечётких когнитивных моделей для предварительного анализа сложных систем и проблемных ситуаций, результаты которого относительно независимо используются для последующего, более углубленного исследования.

Второй подход заключается в гибридизации нечётких когнитивных моделей на основе принципа «функционального замещения», состоящего в замене или усовершенствовании отдельных компонентов нечётких когнитивных моделей компонентами других моделей, позволяющих, таким образом, расширить возможности и улучшить свойства базовых моделей.

Третий подход базируется на предложенном в работе [10] методе построения композиционных гибридных нечётких моделей (на основе принципа гибридизации «с взаимодействием»), когда разные нечёткие модели используются относительно независимо и выполняют различные задачи по достижению общей цели, а также на описании свойств моделей различных классов. Данный подход в наибольшей степени востребован для выполнения комплексных задач анализа систем и процессов, для которых возможна их декомпозиция на отдельные подзадачи, соответствующие подсистемам/объектам/элементам систем и/или этапам/стадиям их процессов.

#### **1. Нечёткие когнитивные модели для предварительного анализа сложных систем и проблемных ситуаций с использованием его результатов для последующего исследования**

Проиллюстрируем реализацию первого подхода, заключающегося в применении нечётких когнитивных моделей для предварительного анализа сложных систем и проблемных ситуаций, результаты которого в дальнейшем относительно независимо используются для более углубленного исследования.

Характерным примером реализации данного подхода является выполнение задачи мониторинга динамики изменения кластеров социотехнических систем, ярко выраженной особенностью которых является разнородность входящих в их состав объектов, а также многообразие и разнотипность взаимосвязей и взаимозависимостей между этими объектами.

Использование нечёткого когнитивного подхода позволяет представить взаимосвязи и взаимозависимости между объектами социотех-

нической системы в виде нечётких отношений взаимовлияния, результаты анализа которых позволяют в последующем решить следующие исследовательские задачи:

- осуществить расчёт системных характеристик, основанных на согласованных нечётких отношениях взаимовлияния нечёткой когнитивной модели [5], из которых обосновано выбрать показатели для идентификации кластеров социотехнической системы;
- выполнить первоначальную идентификацию кластеров социотехнической системы и провести предварительный анализ их устойчивости [11];
- осуществить мониторинг динамики изменения кластеров социотехнической системы, заключающийся в анализе в каждый момент модельного времени: во-первых, изменений кластерной структуры системы (включая анализ: дрейфа центров кластеров, исчезновения и появления новых кластеров, их объединения и разделения); во-вторых, устойчивости кластеров социотехнической системы на основе оценки результатов транзитивного замыкания нечётких отношений взаимовлияния между их объектами [12].

Другим примером эффективного использования нечёткого когнитивного подхода для предварительного анализа с целью последующего углубленного исследования проблемной ситуации является создание и применение «совместимой» нечёткой когнитивной модели [13] для обобщенной оценки степени близости стихотворных текстов к центрам ядер (к типичным произведениям) для различных периодов творчества автора. Система же показателей для этой обобщенной оценки имеет сложную иерархическую структуру, базируется на подмножествах различных (морфологических, синтаксических, ритмических) признаков и позволяет учитывать уровни их совместимости в общей оценке. Помимо прочего, уровни совместимости признаков используются для идентификации различных операций свертки между соответствующими показателями [14].

На рис. 1 показан пример структуры «совместимой» нечёткой когнитивной модели. В сжатом виде проиллюстрирована процедура получения на её основе обобщённой оценки степени близости стихотворных текстов к центрам ядер относительно всего множества признаков на материале лирики М.Ю. Лермонтова.

Здесь NC и LC – «низкий» и «ниже среднего» уровни совместимости между соответствующими подмножествами морфологических, синтаксических и ритмических признаков, которым сопоставляются соответствующие операции свертки показателей:

- для уровня совместимости NC:  $\min(d_k(a_{n_i}), d_l(a_{n_i}))$ ,
- для уровня совместимости LC:  $\text{med}(d_k(a_{n_i}), d_l(a_{n_i}); 0,25)$ .

В дальнейшем результаты обобщённой оценки стихотворных текстов, полученных на основе использования «совместимой» нечёткой когнитивной модели, используются для углубленного исследования динамики изменения авторского стиля в стихотворных текстах для различных творческих периодов, включая:

- определение типичных и отклоняющихся от канона произведений для различных творческих периодов относительно как отдельных подмножеств признаков, так и всего множества признаков;
- определение степени близости произведений к центру ядра с учётом иерархической структуры оценивания и различного уровня совместимости подмножеств показателей;
- анализ «плотности»/«разреженности» текстов внутри и вокруг ядер относительно отдельных подмножеств и всего множества признаков;
- анализ динамики изменения ядер/периферии стихотворных произведений для различных творческих периодов;
- исследование тенденций изменения отдельных показателей, подмножеств показателей, характеристик ядер и периферии стихотворных произведений по различным периодам творчества [14].

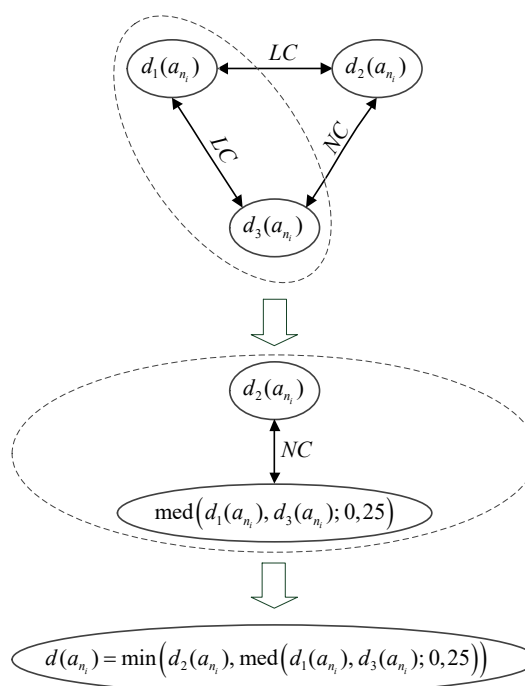


Рис. 1. Пример структуры «совместимой» нечёткой когнитивной модели и процедура обобщенной оценки степени близости стихотворных текстов к центрам ядер относительно всего множества признаков

## 2. Гибридные нечёткие когнитивные модели «с функциональным замещением» для анализа сложных систем и процессов

В случае второго подхода нечёткая когнитивная модель изначально является «модельным каркасом» для анализа системы или проблемной ситуации. А отдельные компоненты этой нечёткой когнитивной модели

подлежат замене или усовершенствованию посредством соответствующих компонентов других моделей с целью расширения возможностей и/или улучшения свойств базовой модели.

Принцип «функционального замещения» для нечётких когнитивных моделей может быть реализован в рамках одной – нечёткой – технологии. При этом может быть осуществлена структурная, параметрическая, либо структурно-параметрическая гибридизация моделей.

На рис. 2 приведён пример гибридной нечёткой когнитивно-игровой модели. В этой модели каждому концепту (игроку) соответствует множество стратегий, выбор которых (и в конечном итоге результат их применения) в общем случае зависит от ресурсов, текущих стратегий и предпочтений игроков.

На рис. 3 представлен пример гибридной нечёткой коалиционной когнитивной модели, позволяющей анализировать различные типы взаимодействия (кооперации, компромисса, содействия и конкуренции) концептов (агентов) с использованием предложенных коалиционных системных показателей. Результаты анализа позволяют в динамике (на основе нечёткой игры, обобщённой на случай произвольного числа игроков) определять и прогнозировать степени принадлежности агентов к различным коалициям, а также их состояние [15].

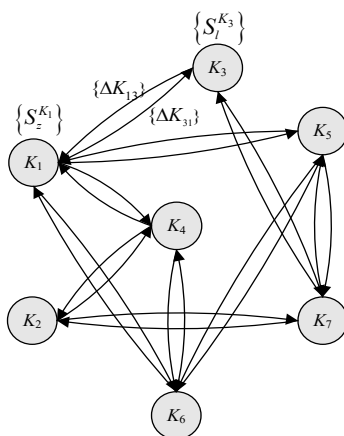


Рис. 2. Гибридная нечеткая когнитивно-игровая модель

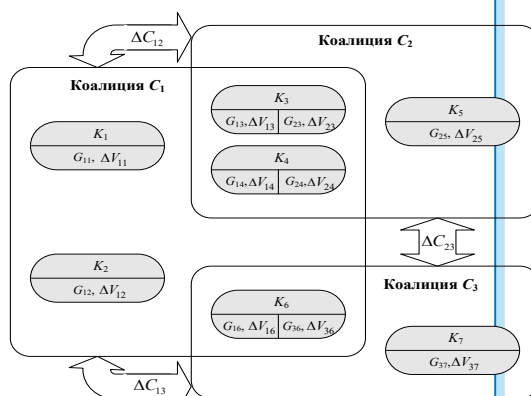


Рис. 3. Гибридная нечёткая коалиционная когнитивная модель

В рассмотренных моделях ряд параметров для нечёткого когнитивного моделирования задаётся на основе использования нечётких игровых моделей, что позволяет отнести их к группе гибридных нечётких когнитивных моделей с параметрической гибридизацией.

На рис. 4 представлена структура разработанной гибридной нечёткой когнитивно-производственной модели, предназначенной для анализа и прогнозирования многомерных временных рядов (МВР) [16, 17].

В этой модели множество концептов характеризуют соответствующие компоненты МВР. Эти концепты связаны подмножествами нечётких степеней влияния, упорядоченных в хронологической последовательности с учетом временных лагов (задержек) соответствующих компонентов МВР. При этом в каждом концепте  $S_j$

модели реализуется соответствующее компоненту многомерного временного ряда нечёткое преобразование  $AGG_j$  с использованием модели ANFIS-типа (Adaptive-Network-based Fuzzy Inference System), обеспечивающие формирование, хранение и вывод прогнозируемых нечётких значений соответствующих компонентом MBP с требуемыми временными задержками.

Гибридная нечёткая когнитивно-продукционная модель обеспечивает многомерный анализ и учет непосредственного и опосредованного взаимовлияния всех компонентом MBP с их различными временными лагами друг относительно друга, а также их прогнозную оценку в условиях нестохастической неопределенности, нелинейности взаимовлияния, частичной несогласованности и существенной взаимозависимости компонентом MBP.

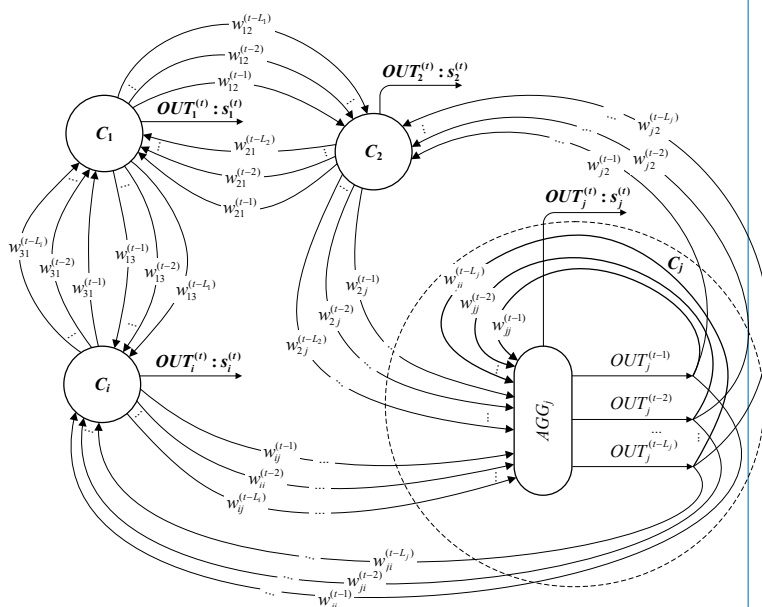


Рис. 4. Структура гибридной нечёткой когнитивно-продукционной модели для прогнозирования многомерных временных рядов

Данную модель следует отнести к группе гибридных нечётких когнитивных моделей со структурно-параметрической гибридизацией.

При гибридизации «с функциональным замещением» на основе сочетания нечёткой и нейросетевой технологий могут быть предложены гибридные нечётко-нейросетевые когнитивные модели (первый упоминаемый признак – «нечёткие» – является доминирующим, а второй – «нейросетевые» – вспомогательным):

- с представлением концептов в виде искусственных нейронных сетей;
- с параметрической оптимизацией на основе алгоритмов обучения (подобных алгоритмам обучения искусственных нейронных сетей) с использованием обучающих выборок;

- с формированием функций принадлежности нечётких множеств в виде компонентов искусственных нейронных сетей;
- с использованием компонентов искусственных нейронных сетей для фаззификации и дефаззификации переменных;

При гибридизации «с функциональным замещением» на основе сочетания нечёткой и эволюционной/биоинспирированной технологий могут быть предложены *гибридные нечётко-эволюционные когнитивные модели* (первый упоминаемый признак – «нечёткие» – является доминирующим, а второй – «эволюционные/биоинспирированные» – вспомогательным) с реализацией нечётких отношений между концептами модели и их параметрической оптимизацией на основе эволюционных/биоинспирированных алгоритмов.

### **3. Композиционные гибридные нечёткие модели «с взаимодействием» для комплексных задач анализа систем и процессов**

Третий подход базируется на предложенном в работе [10] методе создания композиционных гибридных (на основе принципа гибридизации «с взаимодействием») нечётких моделей, основу которых составляют нечёткие когнитивные модели, относительно независимо взаимодействующие с другими (как правило, нечёткими) моделями по достижению общей цели.

Метод включает в себя следующие обобщенные этапы.

*Этап 1.* Декомпозиция комплексной задачи в виде совокупности частных задач (методами системного анализа, анализа сложных систем и процессов и др.).

*Этап 2.* Классификация нечётких моделей на универсальные (продукционные, реляционные, функциональные) и проблемно-ориентированные (функциональные и реляционные оценочные модели; модели событий; модели состояний и управления), а также конкретизация их возможностей по соответствию к требованиям частных задач (в соответствии с предметом анализа; типом динамики; типом неопределенности; методом получения данных).

*Этап 3.* Определение требований к моделям для выполнения каждой из частных задач (каждой из частных задач может быть сопоставлено или несколько групп требований к нечётким моделям).

*Этап 4.* Определение совокупностей нечётких моделей для выполнения частных задач (на основании сопоставления групп требований со стороны частных задач к нечётким моделям определяются совокупности моделей, образующие «дерево покрытия» комплексной задачи).

*Этап 5.* Выбор подмножества нечётких моделей, наиболее рационально реализующих комплексную задачу, т.е. обеспечивающих «покрытие» комплексной задачи в соответствии с возможными критериями рационального выбора, например максимизацией степени пригодности модели, максимизацией минимальной пригодности, максимизации средней пригодности, минимизации мощности «покрытия».



Рассмотрим кратко некоторые примеры разработанных с использованием предложенного метода композиционных гибридных нечётких моделей для комплексных задач анализа систем и процессов.

На рис. 5 представлена структура композиционной гибридной нечёткой модели, предназначенная для управления профессиональными рисками [18].

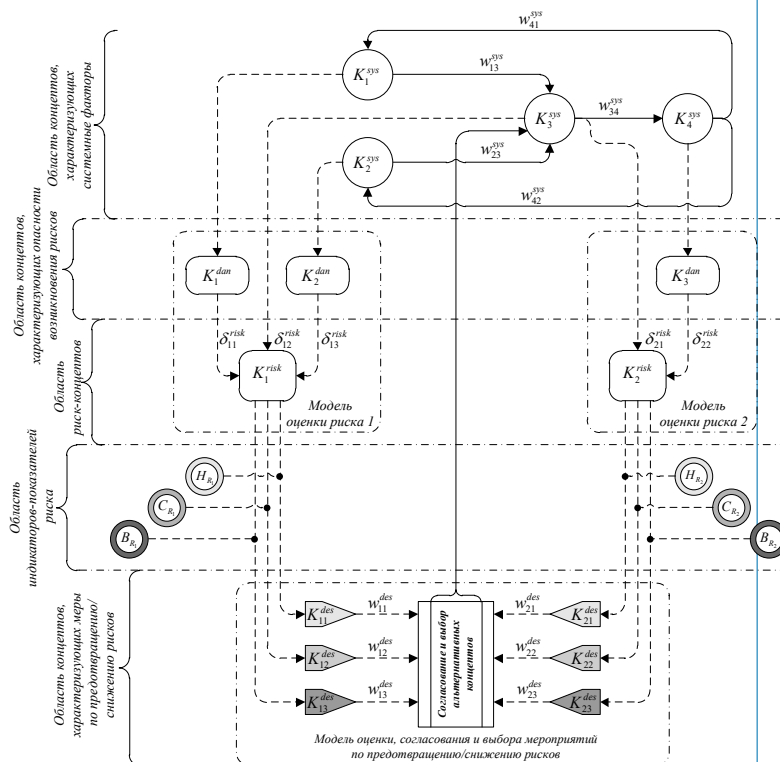


Рис. 5. Структура композиционной гибридной нечёткой модели для управления профессиональными рисками

Основой этой композиционной гибридной модели является нечёткая когнитивная модель, предназначенная для оценки взаимовлияния системных факторов. Для выполнения же задач оценки профессиональных рисков служат нечёткие производственные модели, а для задач оценки, согласования и выбора мероприятий по предотвращению/снижению рисков – нечёткие байесовские модели.

Другим примером служит композиционная гибридная нечёткая модель для мониторинга и управления техногенными рисками на предприятиях электронной отрасли (ПЭО), включающая в себя:

- обобщённую нечёткую когнитивную модель для анализа проблемы мониторинга и управления техногенными рисками на ПЭО (т.е. для комплексного анализа взаимовлияния системных и внешних факторов ПЭО, рисков техногенных нарушений (ТН) и техногенных аварийных ситуаций (ТАС), негативных событий от ТН и ТАС, последствий от ТН и ТАС, см. рис. 6);

- совокупности нечётких продукционных моделей для различных вариантов оценки влияния рисков ТН и ТАС на техногенный риск при реализации различных бизнес-процессов ПЭО (см. рис. 7) [19].

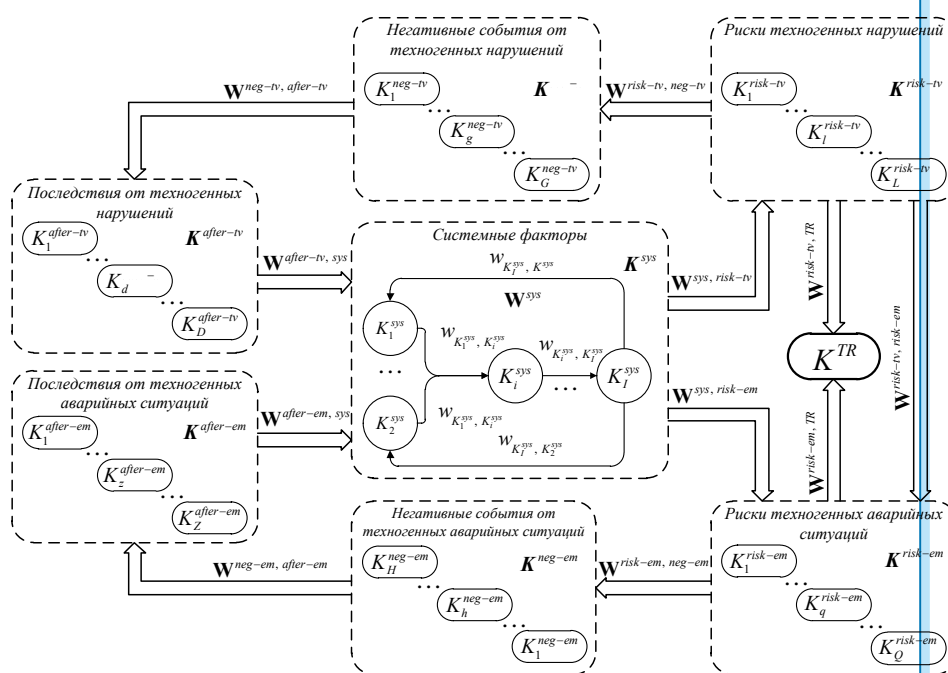


Рис. 6. Структура обобщенной нечёткой когнитивной модели для анализа проблемы мониторинга и управления техногенными рисками на ПЭО

Ещё одним примером реализации 3-го подхода к расширению возможностей нечётких когнитивных моделей является предложенная в [20] композиционная гибридная нечёткая модель для анализа взаимовлияния факторов и оценки готовности формирования МЧС (см. рис. 8), включающая в себя:

- обобщённую нечёткую когнитивную модель  $FCM$ , образованную из совокупности взаимодействующих между собой нечётких когнитивных моделей  $FCM_{1-EXT}, \dots, FCM_{4-EXT}$  уровня типовых подразделений формирования МЧС и предназначенную для анализа взаимовлияния системных и внешних факторов, воздействующих на готовность формирования МЧС в целом;

каскадную нечёткую логическую модель оценки готовности формирования МЧС, нечёткие логические модели  $FLM_1, \dots, FLM_4$  1-го каскада которые служат для оценки готовности подразделений формирования МЧС с учетом выполнения различных задач, входными переменными которых являются значения системных факторов (концептов) нечётких когнитивных моделей уровня подразделений МЧС, а выходные переменные служат входными переменными для нечёткой логической модели  $FLM$  2-го каскада для оценки готовности формирования МЧС в целом, позволяющую комплексно анализировать взаимовлияние факторов, непосредственно и опосредованно воздействующих на готовность подразделений и формирования МЧС в целом, а также выполнять оценку готовности как на уровне подразделений, так и на уровне формирования МЧС при решении различных задач в условиях неопределенности.

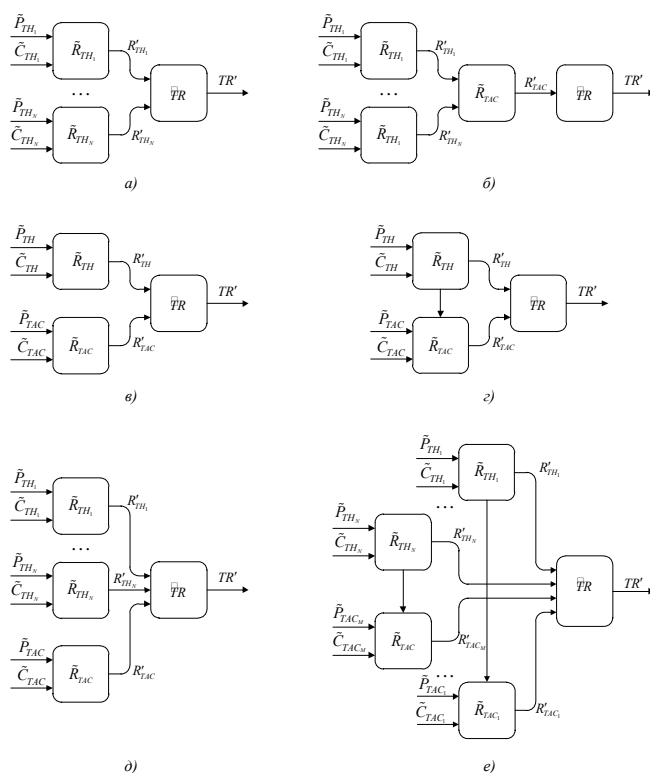


Рис. 7. Структуры нечётких моделей для различных вариантов оценки влияния рисков ТН и ТАС на общий техногенный риск ПЭО

Каждая из когнитивных моделей  $FCM_{i-EXT}$  уровня подразделений включает в себя совокупность взаимозависимых концептов  $\{K_c^i, K_r^i, K_h^i, K_m^i, K_s^i\}$ , характеризующих возможности  $i$ -го подразделения по управлению, разведке, оказанию спасательной, медицинской помощи, возможности по материальному обеспечению, соответственно.

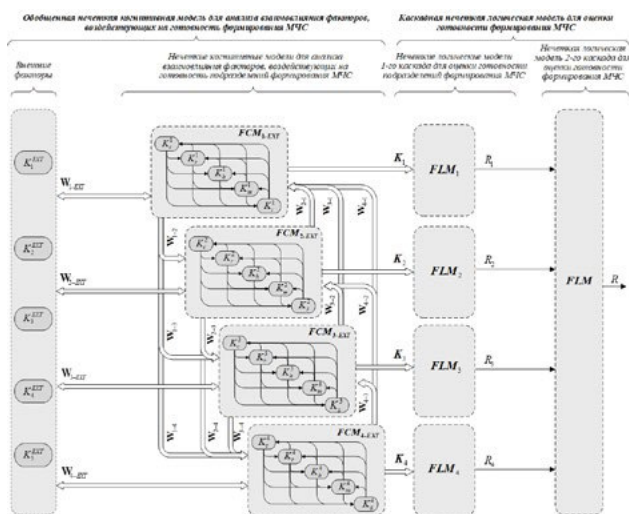


Рис. 8. Структура композиционной гибридной нечёткой модели для анализа взаимовлияния факторов и оценки готовности формирования МРС

На каждую из этих моделей уровня подразделения, в свою очередь, воздействуют внешние факторы. На рис. 9 детализирован пример воздействия (а точнее, взаимодействия) внешних факторов на концепты нечёткой когнитивной модели  $FCM_{i-EXT}$ .

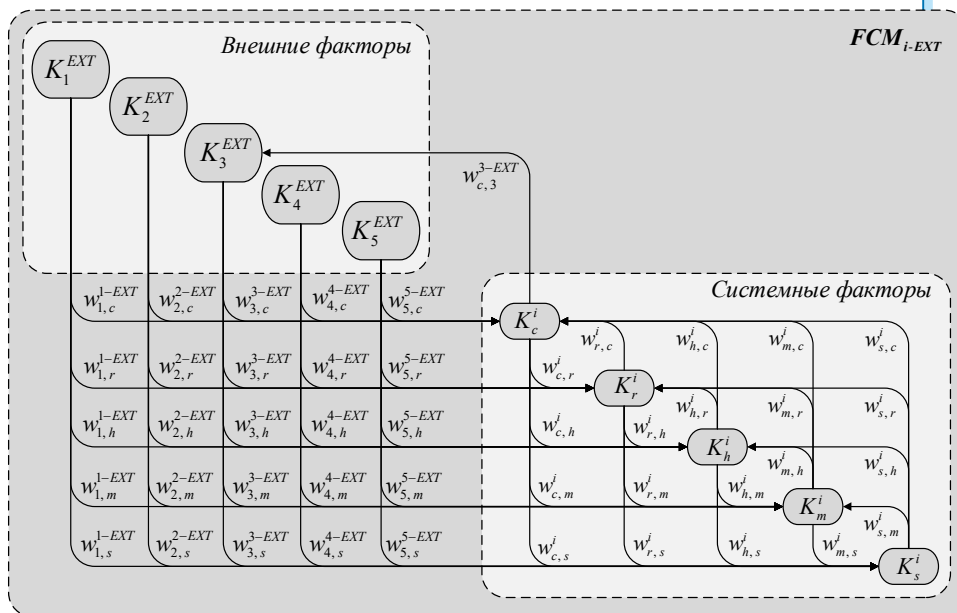


Рис. 9. Детализированный пример взаимодействия внешних факторов и концептов нечёткой когнитивной модели  $FCM_{i-EXT}$

В результате согласования, анализа нечётких отношений взаимовлияния и расчета на их основе системных показателей данной нечёткой когнитивной модели определяется агрегированная степень воздействия входных нечётких переменных  $K_c^i, K_r^i, K_h^i, K_m^i, K_s^i$  (характеризующих возможности  $i$ -го подразделения по управлению, разведке, оказанию спасательной, медицинской помощи, возможности по материальному обеспечению, соответственно) нечёткой логической модели  $FLM_i$  1-го каскада на её выходную нечёткую переменную  $R_i$ , предназначенную для оценки степени готовности этого подразделения.

На основе совокупности взаимодействующих между собой нечётких когнитивных моделей  $FCM_{1-EXT}, \dots, FCM_{4-EXT}$  уровня подразделений формирования МЧС формируется обобщённая нечёткая когнитивная модель  $FCM$  для анализа взаимодействия системных и внешних факторов, воздействующих на готовность всего формирования МЧС.

Результаты согласования, анализа нечётких отношений взаимовлияния и расчета системных показателей, полученные с использованием обобщённой нечёткой когнитивной модели  $FCM$ , в дальнейшем используются для построения нечёткой логической модели  $FLM$  2-го каскада, предназначенной для оценки готовности формирования МЧС в целом.

Предложенная композиционная гибридная нечёткая модель в дальнейшем используется для моделирования системной динамики, оценки и выбора мероприятий, в наибольшей степени влияющих на повышение готовности формирования МЧС в соответствующие моменты модельного времени.

## Заключение

Представлены подходы к использованию нечётких когнитивных моделей для исследования сложных систем и процессов.

Первый подход заключается в использовании нечётких когнитивных моделей для предварительного анализа сложных систем и проблемных ситуаций, результаты которого относительно независимо используются для последующего, более углубленного исследования.

Второй подход заключается в замене или усовершенствовании отдельных компонентов нечётких когнитивных моделей компонентами других моделей, позволяющих, таким образом, расширить возможности и улучшить свойства базовых моделей.

Третий подход базируется на построении композиционных гибридных нечётких моделей, в которых компонентные нечёткие модели используются относительно независимо и выполняют различные задачи по достижению общей цели. Данный подход в наибольшей степени востребован для выполнения комплексных задач анализа систем и процессов, для которых возможна их декомпозиция на отдельные подзадачи, соответствующие подсистемам, объектам, стадиям их процессов.

Приведены конструктивные примеры реализации рассмотренных подходов к использованию нечётких когнитивных моделей для исследования сложных систем и процессов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-29-03088) и Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания № FSWF-2020-0019.*

## Литература

1. Алтунин А.Е., Семухин М.В., Кузяков О.Н. Методы общей теории неопределенностей в геолого-промысловом анализе. — Тюмень: ТИУ, 2018. — 484 с.
2. Борисов В.В., Круглов В.В., Федулов А.С. Нечёткие модели и сети. 2-е изд. стереотип. — М: Горячая линия — Телеком, 2018. — 284 с.
3. Алтунин А.Е. Теоретическое и практическое применение методов принятия решений в условиях неопределенности: Т. 1. Общие принципы принятия решений в условиях различных видов неопределенности. — Изд-во «Издательские решения», 2019. — 484 с.
4. Kosko B. Fuzzy cognitive maps// Int. Journal of Man-Machine Studies. 1986, vol. 24, pp. 65–75.
5. Силов В.Б. Принятие стратегических решений в нечёткой обстановке. — М.: ИНПРО-РЕС, 1995.
6. Carvalho J.P., Tomé J.A. Rule Based Fuzzy Cognitive Maps — Qualitative Systems Dynamics // Proc. of the 19<sup>th</sup> Int. Conf. of the North American Fuzzy In-formation Processing Society, NAFIPS2000, Atlanta, 2000.

7. *Carvalho J.P., Tome J.A.B.* Rule Based Fuzzy Cognitive Maps in Socio-Economic Systems // IFSA-EUSFLAT 2009, 2009, pp. 1821–1826.
8. *Thulukkanam K., Vasuki R.* Two New Fuzzy Models Using Fuzzy Cognitive Maps Model and Kosko Hamming Distance // *Ultra Scientist*. 2015, vol. 27(1)B, pp. 43-55.
9. *Федулов А.С., Борисов В.В.* Анализ нечётких реляционных когнитивных карт // *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*. 2016. № 7. — С. 7–14.
10. *Борисов В.В.* Систематизация нечётких и гибридных нечётких моделей // *Мягкие измерения и вычисления*. 2020. № 2.
11. *Борисов В.В., Арбузов А.Д., Колягина С.Д.* Идентификация и анализ устойчивости кластеров социотехнических систем на основе нечёткого когнитивного подхода // *Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности*. 2020. Т. 5. № 2(16). — С. 43–52.
12. *Арбузов А.Д., Борисов В.В., Дли М.И.* Мониторинг кластеров социотехнических систем на основе нечёткого когнитивного подхода и методов динамической кластеризации // *Мягкие измерения и вычисления*. 2020. № 3.
13. *Borisov V., Fedulov A., Fedulov Ya.* «Compatible» Fuzzy Cognitive Maps for Direct and Inverse Inference // *Proc. of the 18<sup>th</sup> International Conference on Computer Systems and Technologies, CompSysTech'17, June 23-24, Ruse, Bulgaria, ACM International Conference Proceeding Series, Vol. 1369, ACM Inc., N.Y. USA*, pp. 20–27.
14. *Андреев С.Н., Борисов В.В., Коршунова К.П.* Метод нечёткого анализа динамики стилей в стихотворных текстах // *Искусственный интеллект и принятие решений*. №3. 2018. — С.78–90.
15. *Борисов В.В., Устиненков Е.С.* Анализ взаимодействий в сложных системах на основе нечётких когнитивных и игровых моделей // *Нейрокомпьютеры: разработка и применение*. 2009. № 8. — С. 4–12.
16. *Borisov V.V., Luferov V.S.* Forecasting of Multidimensional Time Series Basing on Fuzzy Rule-Based Models // *Proc. of XXI Int. Conf. «Complex Systems: Control and Modeling Problems» CSCMP-2019, September 3-6, 2019, Samara, Russia*, pp. 96–99.
17. *Борисов В.В., Луферов В.С.* Метод многомерного анализа и прогнозирования состояния сложных систем и процессов на основе нечётких когнитивных темпоральных моделей // *Системы управления, связи и безопасности*. 2020. № 2. — С. 1–23.
18. *Борисов В.В., Сеньков А.В.* Интеллектуальное управление рисками в топливно-энергетическом комплексе. — Смоленск: Универсум, 2015. — 170 с.
19. *Андреева О.Н.* Нечёткие когнитивные модели и способ оценки рисков техногенных нарушений и аварийных ситуаций на предприятиях электронной отрасли // *Известия академии электротехнических наук РФ*. 2016. Вып. 18. — С. 81–92.
20. *Борисов В.В., Здиорук Д.А.* Метод оценивания и обоснования мероприятий по обеспечению готовности формирований МЧС на основе нечётких когнитивно-логических моделей // *Мягкие измерения и вычисления*. 2020. № 3.



## **FUZZY COGNITIVE MODELS FOR THE RESEARCH OF COMPLEX SYSTEMS AND PROCESSES**

***V.V. Borisov***

*Branch of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute» in Smolensk, e-mail: vbor67@mail.ru*

### **Abstract.**

Approaches using of fuzzy cognitive models for the research of complex systems and processes are presented. As a rule, fuzzy cognitive models are used for preliminary analysis of complex systems and problem situations, the results of which are used for further in-depth research. Another approach is to replace individual components of fuzzy cognitive models with components of other models to expand capabilities and improve properties. The third approach is based on the designing of composite hybrid fuzzy models, in which individual fuzzy models are used independently and perform different subtasks to solve a general problem.

**Keywords:** complex system, fuzzy cognitive model, composite hybrid model.