

На правах рукописи

Жиряков Сергей Михайлович

МЕТОД РЕДУКЦИИ ОШИБОК НЕЧЕТКИХ РЕШЕНИЙ
В ПРОДУКЦИОННЫХ МОДЕЛЯХ ЗНАНИЙ
ИНТЕРАКТИВНЫХ ТРЕНАЖЕРОВ

Специальность 05.13.17 – Теоретические основы информатики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2011

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете
им. Н.Э.Баумана

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Майков Константин Анатольевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Девятков Владимир Валентинович

кандидат технических наук, доцент
Клышинский Эдуард Станиславович

Ведущая организация: Институт системного анализа РАН

Защита состоится «14» апреля 2011 года в 14 часов 30 минут
на заседании диссертационного совета Д 212.141.10 в Московском
государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана по адресу:
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского
государственного технического университета им. Н.Э.Баумана.

Автореферат разослан «14» марта 2011 года

Ученый секретарь
Диссертационного совета Д 212.141.10
к.т.н., доцент

С.Р. Иванов

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертационной работы

В настоящее время для повышения уровня подготовки операторов сложных технических систем все большее распространение находят интерактивные тренажерные комплексы, позволяющие исключить эксперта-инструктора из процесса тренировки (например, при подготовке летчиков военной и гражданской авиации, операторов ситуационных центров и др.).

Для автоматизированного анализа действий оператора, выявления ошибок и формирования рекомендаций по их устранению интерактивный тренажер содержит экспертную систему, основанную на слабо формализуемых экспертных эвристиках, описывающих на языке, близком к естественному, правила принятия управляющих воздействий и правила анализа действий оператора. В условиях слабой формализации целевая функция решения, формируемая блоком вывода экспертной системы, не всегда обеспечивает получение минимально допустимых значений критериев качества решения. Это приводит к возникновению ситуаций, в которых при заданных входных данных экспертная система формирует решение с неприемлемой погрешностью, то есть возникает ошибочный прецедент решения. Поэтому для сохранения адекватности анализа действий оператора на тренажере необходимо редуцировать ошибку вывода экспертной системы. При этом необходимо учитывать, что любое изменение понятий и правил, определенных экспертом в базе знаний, искажает соответствующее им семантическое содержание в устоявшейся предметной области, что негативно отражается на их интерпретации при взаимодействии с оператором. Поэтому особую актуальность приобретает проблема разработки метода редукции погрешностей в результатах вывода экспертных систем при решении слабо формализуемых задач в условиях неизменности исходных экспертных определений и эвристик.

Широкое практическое применение интерактивных тренажеров, функционально позволяющих заменить инструктора в процессе тренировки, сдерживается отсутствием методов уменьшения погрешности решения слабо формализуемых задач при сохранении начальных экспертных определений и эвристик.

В разработку методов поиска решения в условиях слабой формализации экспертных знаний внесли вклад многие отечественные и зарубежные ученые, такие как Аверкин А.Н, Астанин С.В., Беркинблит Н.Б., Галушкин А.И., Кохонен Т., Круглов В.В., Куинлен Р., Минский М., Недосекин А.А., Попов Э.В, Поспелов Д.А, Усков А.А., Ярушкина Н.Г., Naykin S., Kosko B., Mamdani E.A., Sugeno M., Tsucamoto Y., Zadeh L.A.

Применение известных методов поиска решения в условиях слабой формализации экспертных знаний при необходимости коррекции результатов решения, как правило, требует обработки обучающей выборки

прецедентов решений, определяющих описание ситуации принятия решения и требуемого решения. Однако обработка прецедентов приводит к модификации начальной модели задачи, что при интерактивном анализе действий обучаемого на тренажере приводит к неприемлемому усложнению объяснения решений и интерпретации сообщений тренажера в процессе тренировки. Модификация вводимых экспертом определений понятий и правил поиска решения (эвристик) приводит к потере их семантического содержания и корректности обучения на тренажере.

Поэтому для интерактивных тренажеров актуальна разработка метода коррекции результатов вывода экспертных систем, основанных на слабо структурируемых знаниях, который учитывает контрольные прецеденты решения задачи, но не модифицирует понятия и правила поиска решения, вводимые экспертом в базу знаний тренажера.

Цель и задачи работы

Разработка и исследование метода и алгоритмов редукции ошибок решения слабо формализуемых задач в условиях неизменности начальных экспертных оценок.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие основные задачи:

- провести анализ основных методов решения слабо формализуемых задач и методик коррекции решения в условиях преобладания переменных, измеримых метрической шкалой или шкалой порядка;
- разработать модель редукции ошибок для учета прецедентов решения слабо формализуемой задачи, дополняющую начальную экспертную модель задачи без изменения ее семантического содержания;
- разработать алгоритм вывода решения на основе слабо формализуемых знаний, использующий модель редукции ошибок для коррекции результатов вывода в окрестностях точек частных решений;
- разработать программное обеспечение, реализующее алгоритмы вывода решения, обработки частных решений и построения модели редукции ошибок;
- провести численные эксперименты с целью подтверждения правильности полученных теоретических результатов и проверки разработанных алгоритмов.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования являются методы и алгоритмы решения слабо формализуемых задач логико-лингвистической формализации с преобладанием переменных, измеримых порядковой или метрической шкалой.

Предметом исследования являются методики, модели и алгоритмы редукции ошибок решения, полученного на основе слабо формализованных

знаний, при условии сохранения начальных экспертных оценок.

Методы исследований

Для достижения поставленной в работе цели применялась теория нечеткой логики и нечетких множеств, методы линейной алгебры, математический аппарат теории множеств, продукционная модель представления знаний.

При разработке алгоритмического обеспечения применялись методы объектно-ориентированного программирования с использованием интегрированной среды разработки Microsoft Visual Studio 2008.

Научная новизна

Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке нового метода редукции ошибок нечеткого решения слабо формализуемых задач в условиях неизменности начальных экспертных оценок.

При выполнении диссертационной работы получены следующие основные новые научные результаты, выносимые на защиту:

- предложена нечеткая продукционная модель редукции ошибок, учитывающая требования коррекции решения слабо формализуемой задачи на основе прецедентов решений;
- осуществлена модификация алгоритма нечеткого вывода Суджено, обеспечивающая локальную коррекцию ошибок решения слабо формализуемой задачи в условиях неизменности начальных экспертных оценок;
- разработан алгоритм анализа прецедентов решения слабо формализуемой задачи, обеспечивающий построение обобщенных функций Фабера-Шаудера для локальной поправки решения;
- разработан алгоритм построения продукционных правил модели редукции ошибок, обеспечивающий вычисление поправок на этапе логического вывода модифицированного алгоритма Суджено.

Практическая значимость работы

Практическая значимость диссертационной работы заключается в разработке программной реализации метода редукции ошибок решения слабо формализуемых задач, которая может быть использована при проектировании программного обеспечения интерактивных тренажеров, обеспечивающего анализ и оценку действий обучаемого без привлечения инструктора с использованием слабо формализуемых экспертных эвристик. Предложенный метод адаптации слабо формализуемых (нечетких) знаний экспертов к обучающим прецедентам решения позволяет уменьшать ошибки в выводе экспертных подсистем тренажера без модификации начальных

экспертных оценок и изменения модели решаемой задачи. Результаты работы могут быть использованы для реализации новых интерактивных режимов обучения на тренажерах при подготовке летчиков военной и гражданской авиации, операторов ситуационных центров и сложных технических систем.

Апробация и внедрение результатов работы

Результаты работы внедрены в ОАО «Российская самолетостроительная корпорация «МиГ»» в виде программного модуля тренажера самолета МиГ-29К.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на XVI международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС) (Алушта, 2009 г.), международной конференции «Вычислительная математика, дифференциальные уравнения, информационные технологии» (г.Улан-Удэ, 2009 г.), XIII научно-практическом семинаре «Новые информационные технологии в автоматизированных системах» (Москва, 2010 г.).

Публикации по теме диссертации

По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ (из них 3 статьи в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК). В работах, выполненных в соавторстве, Жирякову С.М. принадлежат результаты, относящиеся к разработке метода редукции ошибок решения слабо формализуемых задач в условиях неизменности начальных экспертных оценок.

Получено 1 свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и библиографического списка литературы из 77 наименований. Содержит 177 страниц, 33 рисунка, 17 таблиц, 16 приложений.

Основное содержание работы

Во введении обосновывается актуальность работы, формулируются цель и задачи, решаемые в диссертации, раскрывается научная новизна и практическая ценность работы.

В первой главе проводится анализ основных известных методов решения слабо формализуемых задач и возможностей редукции ошибок решения в условиях неизменности начальных экспертных оценок и модели задачи. Рассматривается три группы методов, различающихся по способу адаптации знаний к требованиям частных решений задачи: экспертные, алгоритмические и гибридные.

В первой группе анализируются методы нечеткой логики, а также логического, продукционного и фреймового вывода решения. Отмечается свойственная данным методам возможность получения семантически содержательной лингвистической поддержки объяснения решения, что является существенным преимуществом при их практической реализации в интерактивных тренажерах. Коррекция модели задачи в целях устранения погрешности решения в окрестностях частных решений в этом случае проводится экспертом, что является нетривиальной задачей, вследствие необходимости сохранить семантическое содержание первоначально введенных понятий и правил их взаимосвязи. Непосредственный учет частных решений в виде правил зависимостей приводит к избыточности правил поиска решения, что затрудняет интерпретацию информирующих событий и объяснения вариантов решения задачи.

Во второй группе методов рассматриваются методы регрессионного анализа, деревьев решений и нейронных сетей. Показано, что данные методы позволяют осуществлять коррекцию решения путем дополнения обучающей выборки прецедентов решения задачи. В тоже время сложность интерпретации получаемых моделей ограничивает использование методов данной группы в интерактивных тренажерах.

В третьей группе методов рассматриваются гибридные способы получения модели решения слабо формализуемых задач. Данные методы сочетают преимущества методов первых двух групп, поскольку исходная модель решения формируется экспертом, а затем осуществляется ее алгоритмическая коррекция. Недостаток данного подхода заключается в искажении семантического содержания понятий и правил поиска решения задачи, сформированных экспертом при первоначальном построении модели, за счет дополнения или смещения начальных нечетких оценок, что усложняет восприятие и интерпретацию информирующих событий, а также формируемых объяснений в процессе тренировки.

В результате проведенного анализа методов решения слабо формализуемых задач и возможностей редукции ошибок решения обоснована практическая целесообразность и теоретическая возможность модификации одного из основных алгоритмов нечеткой логики - алгоритма нечеткого вывода Суджено. В тоже время, учет частных требований к решению задачи в условиях неизменности начальных экспертных оценок требует разработки нечеткой продукционной модели редукции ошибок, дополняющей начальную экспертную базу знаний задачи.

Во второй главе описан предлагаемый метод редукции ошибок нечетких решений, а также проведено теоретическое обоснование модификации алгоритма нечеткого вывода Суджено и алгоритма построения продукционной модели редукции ошибок.

Метод редукции ошибок нечетких решений базируется на алгоритме нечеткого вывода Суджено и в качестве исходных данных использует

логику-лингвистическую экспертную модель предметной области и значения входных переменных, указываемых в поисковом запросе. При обнаружении в процессе эксплуатации экспертной модели практически неприемлемых ошибок решения (ошибочных прецедентов решения) по требованию эксперта формируется контрольный прецедент решения, определяющий требуемое значение решения при данном значении вектора входных данных. Множество контрольных прецедентов решения является исходной информацией для построения модели редукции ошибок. На этапе логического вывода решения на основе продукционных правил модели редукции ошибок осуществляется вычисление величины поправки, сложение которой с результатами вывода классическим алгоритмом Суджено обеспечивает локальную коррекцию итогового решения в окрестности известных частных решений, введенных в модель редукции ошибок. Функциональная схема предлагаемого метода показана на Рис.1 в нотации диаграммы деятельности UML.

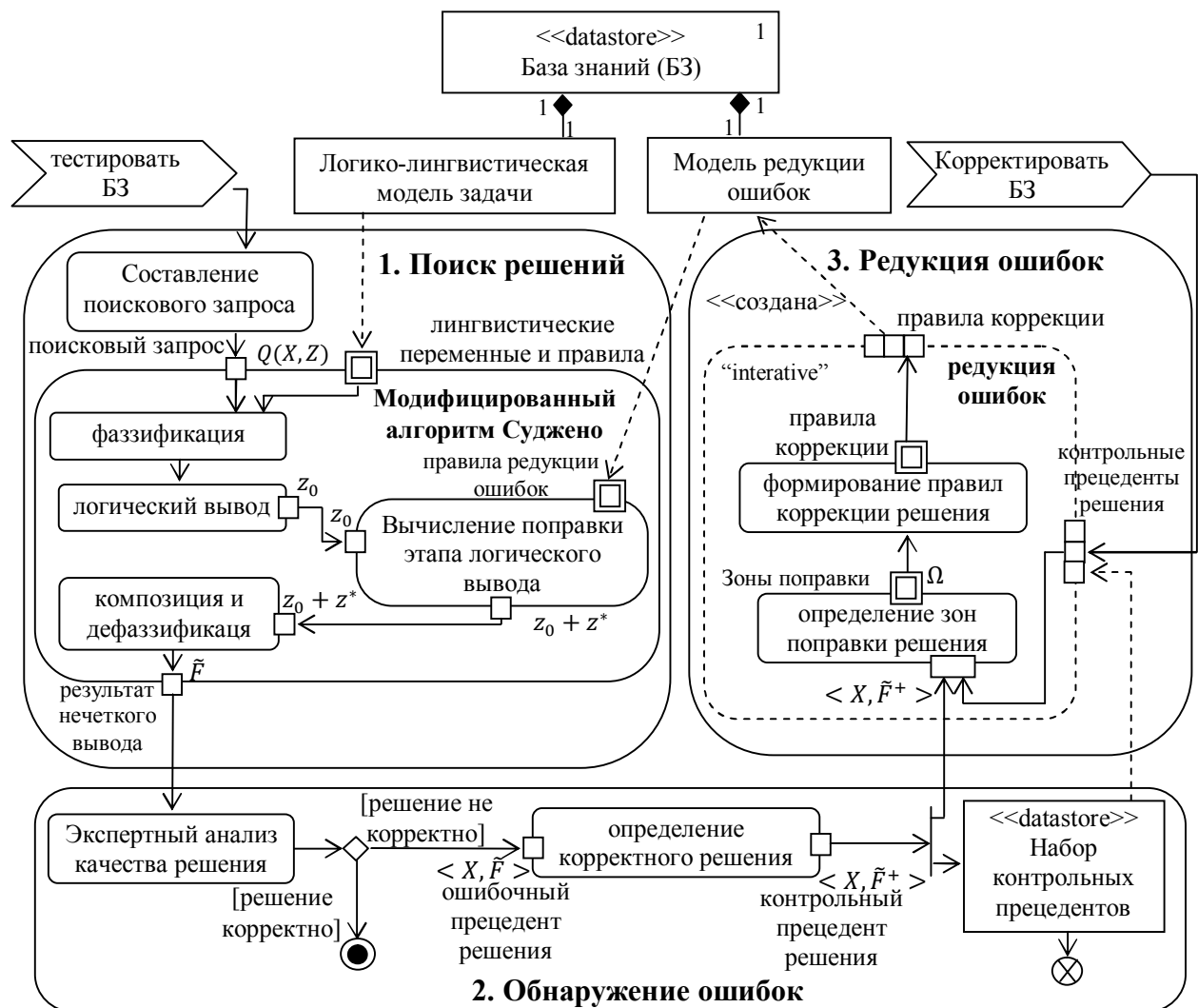


Рис.1 Функциональная схема метода редукции ошибок нечетких решений

Далее покажем основные теоретические выкладки, обосновывающие

расчет величины коррекции решения для произвольных значений входных данных алгоритма нечеткого вывода. Для представления функциональной зависимости вида $f: R^N \rightarrow R^M$ в слабо формализуемой задаче без ограничения общности можно полагать, что логико-лингвистическая модель задачи содержит правила продукции r_j с ядром $\ker r_j = \langle A_j \rightarrow B_j \rangle$, где $A_j = \{(X_k^{j<}, T_{J(j,k)}) \mid k = \overline{1, N}, X_k^{j<} \in R^N\}$, $B_j = (Z^{j>}, T_{J(j,k+1)})$, $Z^{j>} \in R^M$, где $X_k^{j<}$ - определяющие лингвистические переменные, $Z^{j>}$ - переменная вывода.

Этап логического вывода алгоритма Суджено определяет значение переменной вывода Z в виде линейной комбинации определяющих переменных

$$z(x_1, \dots, x_N) = k_0 + \sum_{i=1}^N k_i x_i. \quad (1)$$

В этом случае целевая поверхность отклика выводимой переменной аппроксимируется гиперплоскостью, что может приводить на этапе композиции к получению неприемлемой по величине погрешности.

Предлагаемая модификация алгоритма Суджено основывается на проводимом обобщении базисных функций системы Фабера-Шаудера для многомерных функций и доказанной Колмогоровым возможности аппроксимации функции произвольного числа переменных суммой значений вкладов каждой определяющей переменной независимо друг от друга. В этом случае требуемая поверхность отклика выводимой переменной может быть представлена в виде

$$z(x_1, \dots, x_N) = \lim_{L \rightarrow \infty} \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^n \delta_{l,n}(x_n), \quad \text{где} \quad (2)$$

l - порядок (уровень) приближения, $\delta_{l,n}(x_n)$ - значение обобщенной функции Фабера-Шаудера, определяющей вклад переменной X_n в значение z на l -ом уровне приближения.

Для обеспечения сходимости (2) необходимо использовать аналогичные требования к одномерным функциям системы Фабера-Шаудера и потребовать разбиения пространства $X_1 \times \dots \times X_N$ на зоны решения Ω_d^l , так что

$$\Omega_d^l = \bigcup_i \Omega_i^{l+1}, \quad \Omega_i^{l+1} \cap \Omega_j^{l+1} = \emptyset, \text{ при } i \neq j; i, j = \overline{1, D_{l+1}} \quad (3)$$

$$(\forall L \in N)((x_1, \dots, x_N) \in \Omega_d^L \rightarrow (\forall \Omega_i^L, i \neq d)(\delta_i^L = 0)), \text{ где}$$

$$\delta_d^l(x_1, \dots, x_N) = \sum_{n=1}^N \delta_{l,n}(x_n) - \text{общая поправка в зоне } \Omega_d^l.$$

С учетом разбиения пространства $X_1 \times \dots \times X_N$ на зоны и требований (3) значение выводимой переменной представим в виде

$$z(x_1, \dots, x_N) = \lim_{L \rightarrow \infty} \sum_{l=1}^L \sum_{d=1}^{D(l)} p_d^l(x_1, \dots, x_N) \delta_d^l(x_1, \dots, x_N), \quad (4)$$

где $p_d^l(x_1, \dots, x_N) = \begin{cases} 1, & (x_1, \dots, x_N) \in \Omega_d^l, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$ – признак необходимости учета

поправки δ_d^l в итоговом решении, δ_d^l – общая поправка в зоне Ω_d^l .

Для расчета величины δ_d^l используется преобразованное соотношение Суджено (1)

$$\delta_d^l = z(x_1, \dots, x_N) = z_{d,0}^l + K_d^l \sum_{i=1}^N (v_{d,i}^l \cdot \alpha_i(x_i)), \quad (5)$$

где K_d^l – общий коэффициент зоны Ω_d^l , $v_{d,i}^l \in [0,1]$ – коэффициент влияния переменной X_i в общем значении поправки, $\alpha_i(x_i) \in [0,1]$ – значение функции принадлежности терма, расположенного в левой части продукционного правила, вычисленное на этапе фаззификации алгоритма нечеткого вывода.

Окончательно для этапа логического вывода модифицированного алгоритма Суджено значение выводимой переменной определяется в виде

$$z(x_1, \dots, x_N) = z_0 + \sum_{i=1}^N k_i x_i + \frac{\sum_{d=1}^D p_d^l(x_1, \dots, x_N) \cdot \left(z_{d,0}^l + K_d^l \sum_{i=1}^N (v_{d,i}^l \cdot \alpha_i(x_i)) \right)}{\sum_{d=1}^D p_d^l(x_1, \dots, x_N)}. \quad (6)$$

Для редукции ошибок решения в соответствии с (6) осуществляется построение логико-лингвистической продукционной модели на основе данных о частных решениях задачи. Блок-схема алгоритма построения модели редукции ошибок показана на Рис.2.

Модель редукции ошибок состоит из продукционных правил четырех видов:

$$\text{Если } (R_{x_1} = T_{l,d,k}^{R_{x_1}}) u \dots u (R_{x_N} = T_{l,d,k}^{R_{x_N}}) \text{То } (G^k = T_{l,d}^{G^k}), \quad k = \overline{0, N} \quad (7)$$

$$\text{Если } (G^0 = T_{l,d}^{G^0}) u \dots u (G^N = T_{l,d}^{G^N}) \text{То } (\Omega = T_{l,d}^{\Omega}) \quad (8)$$

$$\text{Если } (\Omega = T_{l,d}^{\Omega}) u (D_{x_1}^l = T_{l,d}^{D_{x_1}^l}) u \dots u (D_{x_N}^l = T_{l,d}^{D_{x_N}^l}) \text{То } (D_l = T^{D_l}) \quad (9)$$

$$\text{Если } (D_1 = T^{D_1}) u \dots u (D_L = T^{D_L}) \text{То } (D = D_1 + \dots + D_L) \quad (10)$$

Правила вида (7), (8) используются для локализации области поправки, правило вида (9) используется для вычисления величины поправки, а правило вида (10) определяет суммарное значение поправки. Таким образом, редукция ошибок решения обеспечивается не модификацией исходной экспертной модели, с помощью которой осуществляется объяснение решения, а формированием дополнительной модели редукции ошибок, построенной на основе обработки контрольных прецедентов решения задачи.

Для расчета параметров правил модели редукции ошибок используются разработанные алгоритмы обработки частных решений задачи,

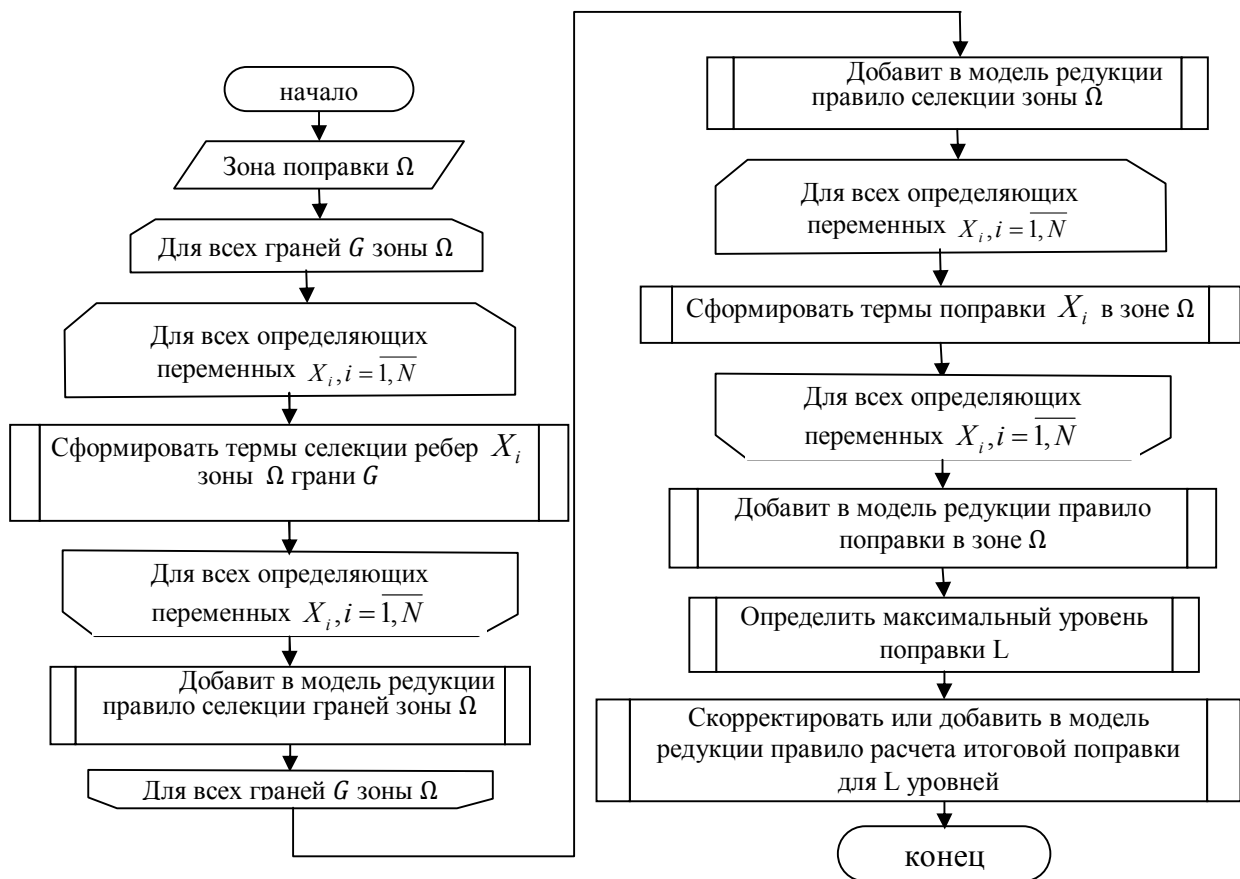


Рис.2 Блок-схема алгоритма построения продукционных правил модели редукции ошибок

которые обеспечивают:

- разбиение пространства входных переменных $X_1 \times \dots \times X_N$ на иерархию вложенных зон Ω_d^l , удовлетворяющих (3);
- построение продукционных правил вывода модели редукции ошибок;
- определение положения функций принадлежности термов в правилах модели редукции ошибок;
- расчет значений $z_{d,0}^l$, K_d^l , $v_{d,i}^l$ для продукционных правил вывода модели редукции ошибок.

Разбиение пространства входных переменных $X_1 \times \dots \times X_N$ на зоны Ω_d^l осуществляется алгоритмом обработки точек контрольных прецедентов решений $P_Z = \{\vec{p}_t(x_1, \dots, x_N, z) \mid t = \overline{1, T_Z}\}$, задающих значение решения z^0 при входных данных (x_1^0, \dots, x_N^0) . Блок-схема алгоритма показана на Рис.3. Зона решения является n-мерным симплексом и представляется в виде упорядоченной пары $\Omega = \langle B, \vec{c} \rangle$, где \vec{c} – радиус-вектор основания зоны, $\vec{c} \in P_Z$, $B = \{\vec{b}_1, \dots, \vec{b}_N\}$ – система из N линейно независимых векторов (базис зоны), причем $\vec{b}_i = \vec{p}_i - \vec{c}$.

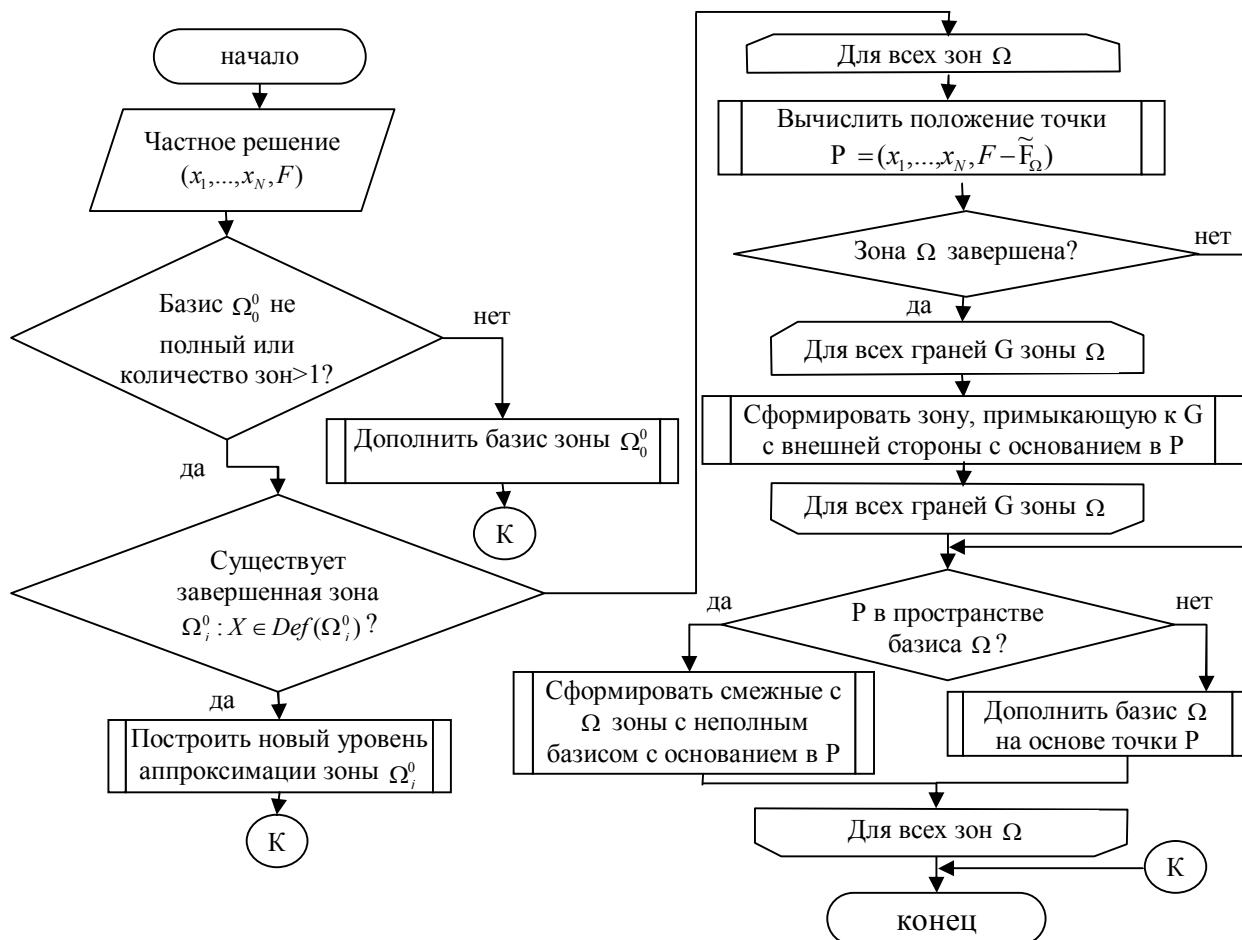


Рис.3 Блок-схема алгоритма обработки частных решений и построения зон поправки решения

В процессе построения базиса зоны может включать в себя как векторы стандартного базиса, так и векторы, образованные на основе контрольных прецедентов решения. Обработка прецедентов строится таким образом, чтобы в первую очередь осуществить замещение в базисах зон векторов стандартного базиса на векторы, образованные с помощью контрольных прецедентов.

Основание зоны \vec{c} и векторы ее базиса $\{\vec{b}_1, \dots, \vec{b}_N\}$ задают положение гиперплоскости, определяющей признак $p_d^l(x_1, \dots, x_N)$ учета поправки в итоговом решении и значение обобщенной функции Фабера-Шаудера $\delta_d^l(x_1, \dots, x_N)$, определяющей величину этой поправки.

Расчет значений p_d^l и δ_d^l проводится следующим образом.

Представив произвольный вектор $\vec{x} \in X_1 \times X_2 \dots \times X_N \times Z$ в виде суммы его ортогональных составляющих $\vec{x}^0 \in X_1 \times X_2 \dots \times X_N$ и $\vec{x}^\perp \in Z$, выразим поправку δ_d^l для зоны Ω_d^l из разложения \vec{x} по базису зоны Ω_d^l в виде

$$\delta_d^l = \vec{x}^\perp = \sum_{n=1}^N \alpha_n \vec{b}_n^\perp + \vec{c}_{l,d}^\perp, \quad (11)$$

где α_n -коэффициенты разложения \vec{x} по базису зоны Ω_d^l . Обозначив

$B_{n \times n} = (b_{i,j})$, $B_{n \times n}^{-1} = (b_{i,j}^{-1})$, выражение (11) преобразуем к виду

$$\delta_d^l(x_1, \dots, x_N) = \sum_{n=1}^N k_{d,n}^l x_n^* + \tilde{\delta}_d^l, \text{ где} \quad (12)$$

$$k_{d,n}^l = b_n^+ \sum_{j=1}^N b_{j,n}^{-1}, \quad \tilde{\delta}_d^l = \bar{c}_{l,d}^+ - \sum_{n=1}^N b_n^+ c_{l,d,n} \sum_{j=1}^N b_{j,n}^{-1}.$$

Для расчета p_d^l требуется выполнение условий

$$(\bar{x}^0 - \bar{c}_{l,d}^0) \cdot \bar{h}_k^0 \geq 0, (\forall k \in \{1, 2, \dots, N\}), (\bar{x}^0 - \bar{c}_{l,d}^0 - \bar{b}_1^0) \cdot \bar{h}_0^0 \geq 0, (\forall j \in \{1, 2, \dots, N\}), \quad (13)$$

что справедливо при

$$q^k(x_1, \dots, x_N) = \sum_{i=1}^N x_i q_i^k - \tilde{q}^k \geq 0 \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, N\} \text{ и } \sigma(x_1, \dots, x_N) = \sum_{i=1}^N x_i s_i - \tilde{s} \in [0, 1], \text{ где} \quad (14)$$

$$q_i^k = b_{k,i} - \sum_{j=1}^N \left(\sum_{m=1}^{N-1} \left(\sum_{p=1}^{N-1} g_{n,p}^k \cdot \tilde{g}_{p,m}^k \right) \cdot g_{j,m}^k \right) \cdot b_{k,j}, \quad \tilde{q}^k = \sum_{i=1}^N c_{i,d}^l \left[b_{k,i} - \sum_{j=1}^N \left(\sum_{m=1}^{N-1} \left(\sum_{p=1}^{N-1} g_{n,p}^k \cdot \tilde{g}_{p,m}^k \right) \cdot g_{j,m}^k \right) \cdot b_{k,j} \right],$$

$\tilde{g}_{p,m}^k$ – элемент матрицы $(G_k^T G_k)^{-1}$, $s_i = \sum_{j=1}^N b_{j,i}^{-1}$, $i = \overline{1, N}$, $\tilde{s} = \sum_{j=1}^N \left(\sum_{i=1}^N b_{i,j}^{-1} \right) c_j^{l,d}$, $\bar{h}_k, k = \overline{0, N}$ –

ортогональное дополнение к системе базисных векторов граней G_k , причем $\bar{h}_k \cdot \bar{b}_k \geq 0$ при $k = \overline{1, N}$ и $\bar{h}_0 \cdot \bar{b}_0 \leq 0$.

Выражения (11),(12) для расчета поправки δ_d^l и (13),(14) для критерия p_d^l позволяют определить положение функций принадлежности термов в правилах модели редукции ошибок. Показано, что в общем случае линейная комбинация $z = k_0 + \sum_{i=1}^N k_i x_i$ в зоне Ω с основанием $\bar{c} = (c_1, \dots, c_{N+1})$ может быть выражена в виде

$$z = c_{N+1} + K \sum_{i=1}^N (v_i \cdot \alpha_i(x_i)), \text{ где} \quad (15)$$

$$v_i = \frac{k_i \cdot |\Omega|_i}{K}, \quad K = \sqrt{\sum_{i=1}^N (k_i \cdot |\Omega|_i)^2}, \quad |\Omega|_i - \text{протяженность зоны вдоль оси,}$$

заданной ортом стандартного базиса \bar{e}_i , $\alpha_i(x_i)$ - функция принадлежности треугольного вида.

Таким образом, учет частных решений задачи в модели редукции ошибок обеспечивает локальную коррекцию результатов классического алгоритма нечеткого вывода. Суджено и повышает практическую приемлемость решения без изменения начальной экспертной модели задачи.

В третьей главе описывается программное обеспечение, использующее разработанные теоретические положения и алгоритмы.

Основными подсистемами разработанного программного обеспечения являются подсистемы подготовки данных (составление словаря понятий и продукционных правил), поиска и коррекции решения.

В процессе разработки программного обеспечения построена система классов на языке C#, обеспечивающая реализацию структурных шаблонов поиска решения на основе логико-лингвистической модели, реализацию

этапов нечеткого вывода, учет контрольных прецедентов решения задачи, расчет поправок решения. Программно реализован разработанный модифицированный алгоритм нечеткого вывода решения Суджено, обеспечивающий локальную коррекцию ошибок решения в условиях неизменности начальных экспертных оценок с помощью правил модели редукции ошибок.

Также программно реализованы алгоритмы обработки контрольных прецедентов решения задачи, обеспечивающие расчет границ зон поправки и величину поправки, алгоритмы формирующие правила и термы модели редукции ошибок.

В четвертой главе осуществляется экспериментальная проверка теоретических положений и алгоритмов, разработанных в настоящей работе в форме решения практической задачи анализа траектории качественного маневра для преследования цели на вираже в рамках учебно-тренировочного режима работы интерактивного тренажера самолета МиГ-29К. Схема выполнения маневра представлена на Рис.4.

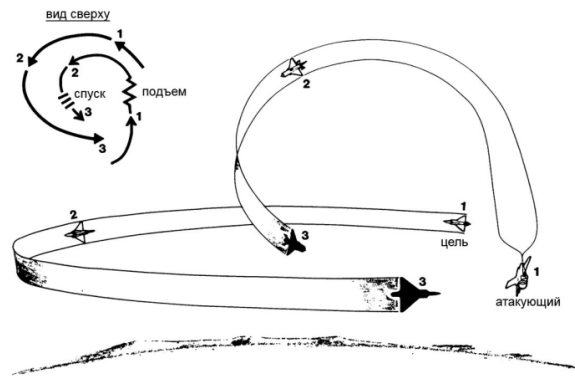


Рис.4. Тактическая схема выполнения вертикального маневра «верхний двойной вираж»

Задача анализа траектории качественного маневра преследования цели заключается в расчете на основе логико-лингвистической модели значений входных параметров модели движения самолета (перегрузки и угла крена), на основе которых осуществляется построение траектории движения атакующего самолета. Это обеспечивает оценку действий летчика и формирование корректирующих информирующих сообщений для правильного выполнения маневра «верхний двойной вираж» в ситуации ближнего маневренного боя.

На основе данных выполнения маневра с практически приемлемыми значениями показателей качества построена логико-лингвистическая модель выполнения качественного маневра в ограниченных начальных условиях (см. Таблица 1). В качестве определяющих параметров модели выполнения маневра применены нечеткие лингвистические переменные «угол отставания по виражу» и «временная фаза выполнения маневра». Выводимыми переменными, определяющими форму траектории маневра, являются

«перегрузка» и «угол крена». Определение лингвистических переменных и термов показано на Рис.5.

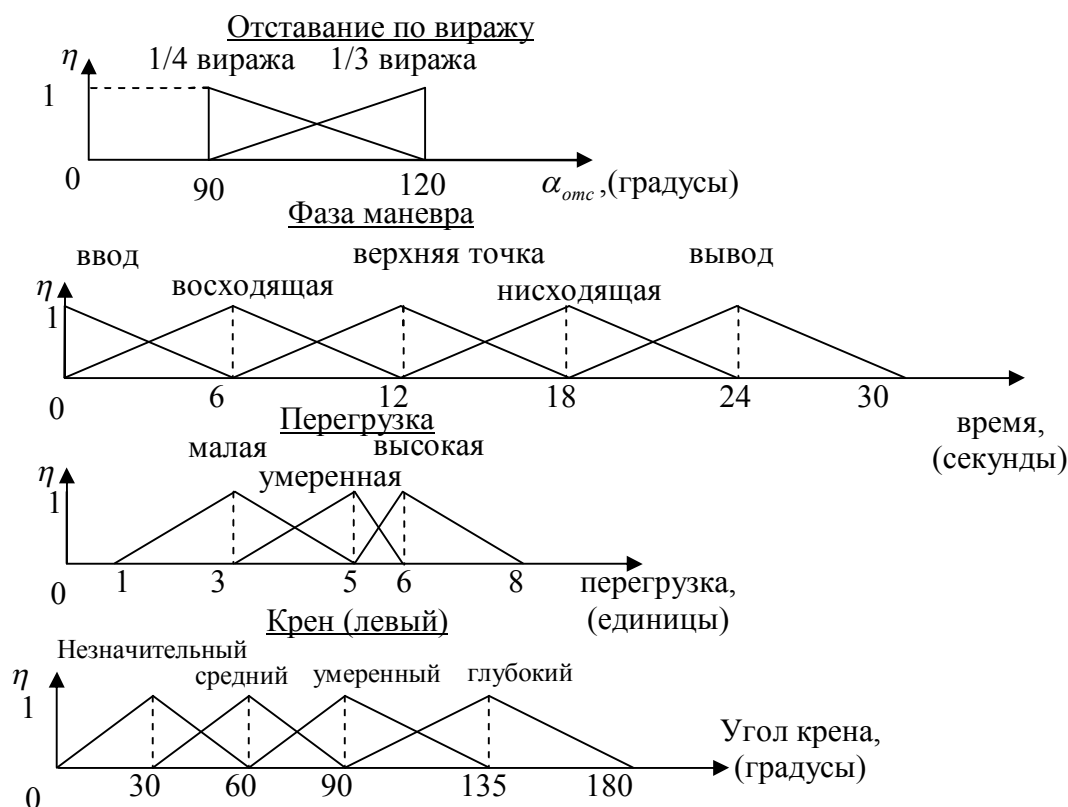


Рис.5. Нечеткие переменные и термы логико-лингвистической модели выполнения маневра «верхний двойной вираж».

Таблица 1

Логико-лингвистическая модель выполнения маневра

№	Условие правила			Заключение правила	
	Угол отставания	Фаза маневра		Перегрузка	Крен
1	1/4 виража	ввод	то	высокая	незначительный
2		восходящая	то	высокая	умеренный
3				умеренная	
4		верхняя точка	то	малая	умеренный
5				умеренная	глубокий
6		нисходящая	то	умеренная	средний
7				вывод	то
8		умеренный			
9	1/3 виража	ввод	то	высокая	незначительный
10					средний
11		восходящая	то	высокая	умеренный
12					
13		верхняя точка	то	умеренная	умеренный
14					глубокий
15		нисходящая	то	высокая	средний
16					умеренный
17		вывод	то	высокая	умеренный

На основе составленной логико-лингвистической модели был осуществлен расчет значений управляющих параметров движения самолета с помощью упрощенного алгоритма нечеткого вывода (Алгоритм 1), алгоритма

Сужено (Алгоритм 2), модификации алгоритма Сужено без учета контрольных прецедентов решения (Алгоритм 3) и модификации алгоритма Сужено с учетом контрольных прецедентов решения (Алгоритм 4) при трех различных начальных условиях.

Для определения качества маневра, получаемого с помощью указанных алгоритмов, применены четыре показателя оценки качества: дистанции E_1 , азимута E_2 , угла места E_3 и курсового угла цели. Для качественного маневра необходимо, чтобы значения показателей качества азимута E_2 и угла места E_3 принимали значения не ниже 85%.

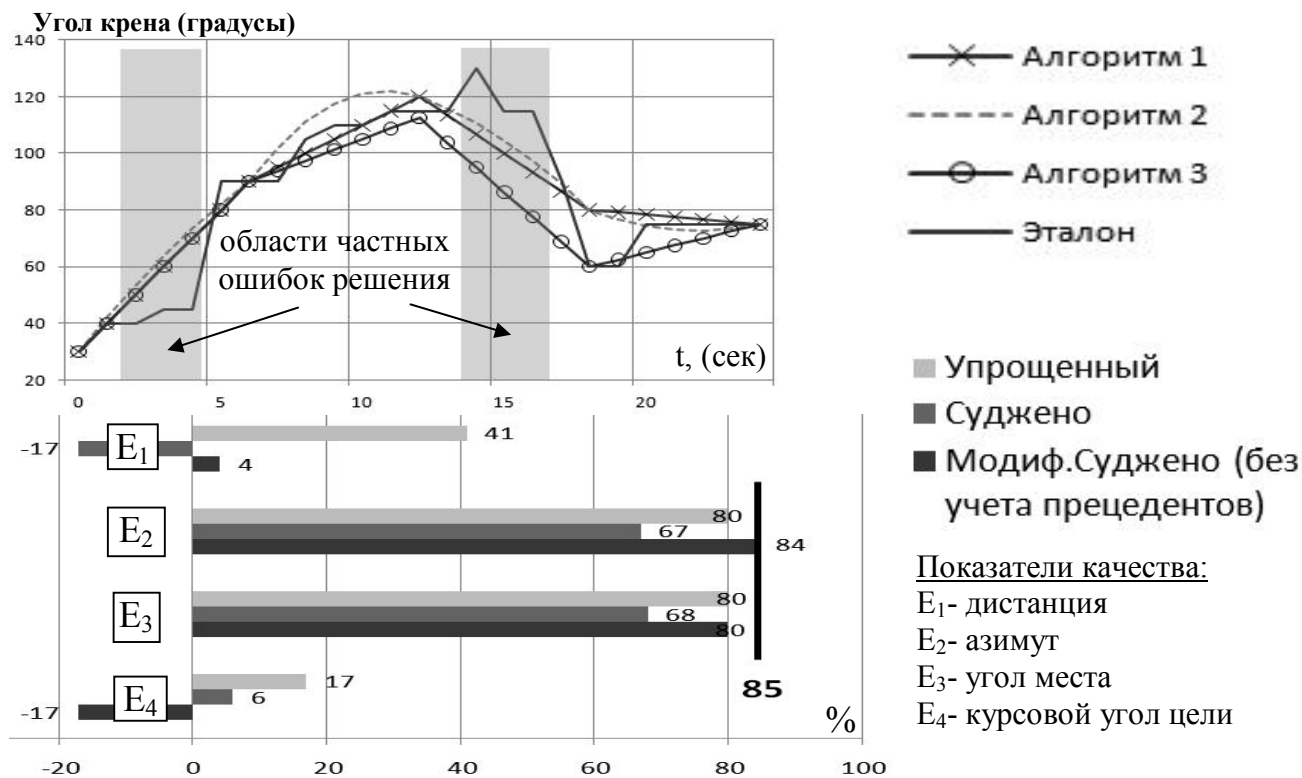


Рис.6. Значения угла крена и показатели качества маневра при угле отставания 90° .

При вычислении значений угла крена на основе экспертной логико-лингвистической модели с использованием Алгоритма 1 и 2 возникают ошибки вычисления угла крена в начале восходящей фазы и конце фазы «верхняя точка» маневра, достигающие 20-30 градусов, что приводит к уменьшению значений показателей качества E_2 и E_3 ниже уровня 85%(см.Рис.6).

Для снижения величины ошибок решения в модель редукции ошибок были введены данные по семи частным решениям для зависимости, задающей значение угла крена. Это позволило в Алгоритме 4 повысить значения показателей качества по сравнению с Алгоритмом 3 в среднем на 18%, а относительно показателей E_1 и E_4 - на 27% (см. Рис.7). Также учет частных решений в Алгоритме 4 позволил получить значения показателей E_2 и E_3 выше 85%, что необходимо для получения качественного маневра. Алгоритм 4 позволил повысить значения показателей качества относительно алгоритмов 1,2,3 соответственно на 6%, 22%, 18%.

Таким образом, результаты проведенных численных экспериментов показывают, что традиционные алгоритмы нечеткого вывода решения, использующие слабо формализуемые экспертные знания выполнения маневра верхний двойной вираж, не позволяют добиться получения результата приемлемого качества. В тоже время использование модифицированного алгоритма нечеткого вывода Суджено и модели редукции ошибок, после учета семи частных решений, позволило повысить практическую приемлемость результата до заданного уровня качества без изменения исходной экспертной модели выполнения маневра.

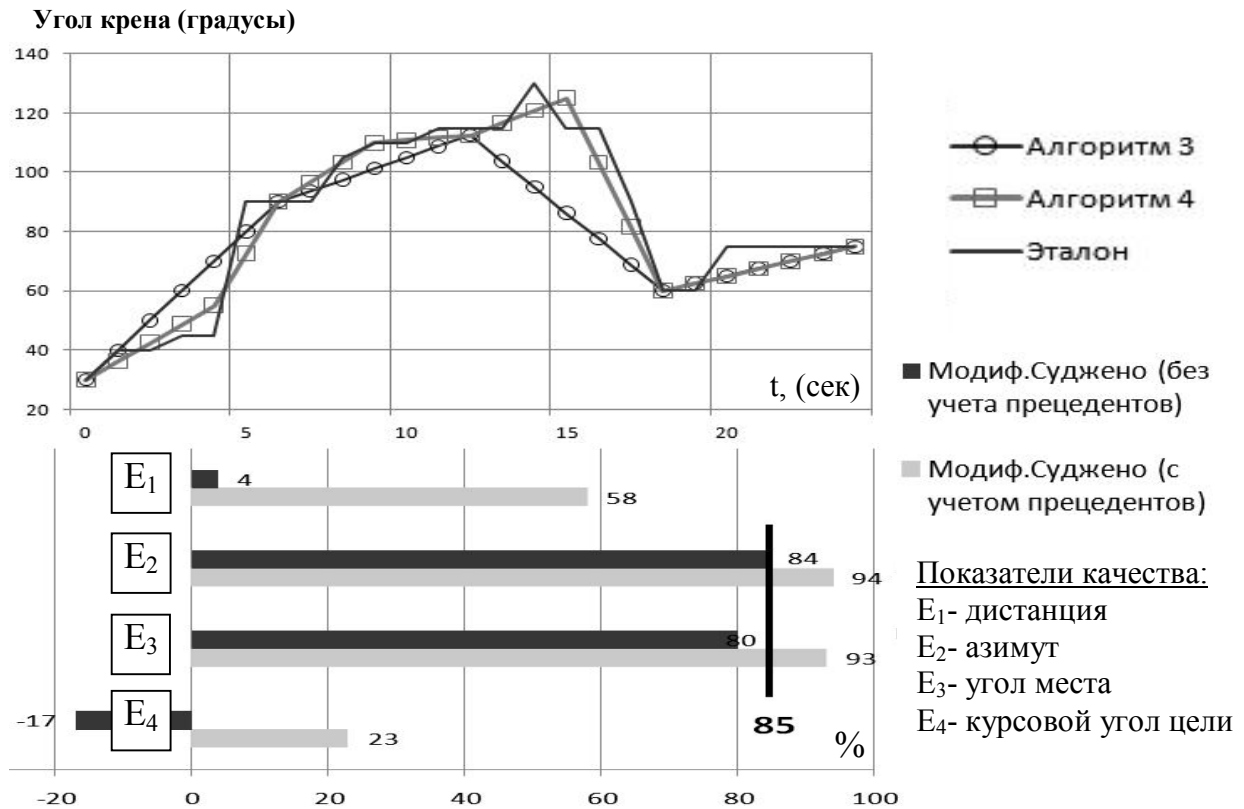


Рис.7. Значения угла крена и показатели качества маневра при угле отставания 90° с учетом модели редукции ошибки.

Основные результаты работы

1. Разработан метод редукции ошибок нечетких решений, позволяющий достигать требуемых значений показателей качества решения слабо формализуемой задачи при неизменности начальных экспертных определений в базе знаний;
2. Построена модель редукции ошибок, использующая контрольные прецеденты решения задачи для дополнения начальной базы знаний без изменения ее семантического содержания;
3. Разработана модификация алгоритма нечеткого вывода Суджено, использующая модель редукции ошибок для коррекции результатов нечеткого вывода в окрестностях частных точек решения;
4. Разработаны программные реализации модифицированного алгоритма нечеткого вывода решения Суджено, а также алгоритмов обработки контрольных прецедентов решений и построения модели редукции ошибок;
5. Полученные теоретические результаты и программная реализация

разработанных алгоритмов применены для решения практической задачи анализа качественного маневра «верхний двойной вираж» и внедрены в ОАО «РСК «МиГ»» в программное обеспечение тренажера самолета МиГ-29К.

6. Разработанный метод редукции ошибок позволяет расширить класс задач подготовки операторов на интерактивных тренажерах без привлечения инструктора за счет использования в лингвистической форме слабо формализуемых экспертных эвристик при анализе действий оператора.

Публикации по теме диссертации

- 1) Рогозин О.В., Жиряков С.М. Метод повышения точности нечеткого вывода в слабо формализованных задачах// Приборы.-2008.-№4.-С.48-52.
- 2) Повышение точности решения задач при использовании нечеткой логики /С.М.Жиряков [и др.]//Вестник Бурятского государственного университета.- 2008.- №9.– С.180-183.
- 3) Жиряков С.М. Коррекция нечеткого вывода с использованием термовспутников для повышения точности решения// Сборник трудов молодых учёных, аспирантов и студентов МГТУ им. Н.Э. Баумана.- 2008.- №6.– С.74-78.
- 4) Майков К.А., Жиряков С.М. Адаптация нечеткого вывода к критическим зонам ошибок управления в задачах управления// Приборы.- 2009.-№2.– С.22-29.
- 5) Применение аппарата нечеткой логики в построении контроллеров /С.М. Жиряков [и др.] //Мехатроника, автоматизация, управление.– 2009.– №1.– С.68-86.
- 6) Жиряков С.М., Майков К.А. К вопросу уменьшения погрешности решения слабоформализованных задач с использованием алгоритмов нечеткой логики //Вычислительная математика, дифференциальные уравнения, информационные технологии: Сборник материалов молодых ученых международной конференции.– Улан-Удэ,2009– С.79-86.
- 7) Жиряков С.М., Майков К.А. К вопросу определения зависимостей между лингвистическими переменными в нечетких моделях задач принятия решения //Материалы XVI международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС 2009),25-31 мая 2009г.,г.Алушта.–М., 2009– С.300-302.
- 8) Жиряков С.М., Майков К.А. О решении проблемы адекватности моделирования в нечеткой логике// Вестник Бурятского государственного университета.–2009.– №9.– С.126-131.
- 9) Жиряков С.М. Метод коррекции нечетких логико-лингвистических моделей в условиях неизменности экспертных оценок// Новые информационные технологии в автоматизированных системах: Материалы тринадцатого научно-практического семинара.– М., 2010.– С.37-41.