



модель с нечетким выводом, со структурой, приведенной на рис. 2.

Данный блок-идентификатор позволяет устранить следующие недостатки, присущие нечетким системам:

- дает возможность дополнять исходный набор правил, описывающий состояния системы управления, который формируется человеком и вследствие чего может иметь неполный набор правил, противоречивые или идентичные правила;

- оптимизировать параметры модели управления, которые изначально задаются экспертом субъективно, что снижает качество идентификации. Целенаправленное изменение параметров нечеткой модели, таких как количество, форма, относительное размещение соответствующих функций принадлежности вдоль базовых осей оказывают существенное влияние на характер идентификации.

Блок-идентификатор состоит из базы знаний, которая представляет собой совокупность информации о базе нечетких правил и множестве лингвистических переменных с соответствующими функциями принадлежности.

Работа по формированию базы знаний происходит в два этапа:

- на первом этапе база знаний формируется на основе обучающей выборки, которая состоит из параметров наблюдений с соответствующими принадлежностями классам наблюдений и доступной априорной информации об объекте у эксперта;

- на втором этапе происходит параметрическая оптимизация к дискретному изменению динамики объекта управления.

Далее блок-идентификатор формирует оптимальную аппроксимацию для входных обучающих данных  $X(\vartheta, M, \delta)$ , где  $\vartheta, M, \delta$  – угол тангажа, число Маха и угол отклонения руля высоты соответственно.

После обучения блок-идентификатор реализует следующее уравнение [1]:

$$n_y(k) = F(M(k), C[\vartheta(k), M(k), \delta(k)]), \quad (1)$$

где  $n_y$  – нормальная перегрузка;  $C$  – аэродинамический коэффициент подъемной силы.

**Самонастраивающаяся нечеткая эталонная модель.**

Предполагается использование такой ЭМ, которая при работе линейного регулятора, обеспечивающего устойчивость на всех режимах полета, улучшала бы качество системы управления БПЛА, используя свои адаптивные свойства совместно с блок-идентификатором (БИ).

Для этого БИ содержит следующую информацию о параметрах БПЛА:

1) динамические параметры:  
– максимально допустимое перерегулирование [2]:

$$Mp_{\max} = e^{-\pi(\nu/\sqrt{1-\nu^2})} \times 100\%; \quad (2)$$

– экстремальные значения собственной частоты (с затуханием и без затухания)  $\omega_{\max d}$  и  $\omega_{\max 0}$ ;

2) текущие значения параметров, измеряемые датчиками ДПЛА:

- текущие углы крена  $\gamma$ , тангажа  $\sigma$ , курса  $\psi$ ;
- текущая скорость  $M(t)$ ;

3) константы максимально допустимых значений:

- максимально допустимые (если такие имеются согласно ТЗ) углы крена  $\gamma$ , тангажа  $\sigma$ , курса  $\psi$ ;
- максимально допустимая скорость  $M_{\max}(t)$ ;
- максимально допустимые перегрузки  $n_x, n_y, n_z$ ;
- максимальные углы отклонения рулей;

4) идентифицируемые параметры:

- результат идентификации параметров БПЛА.

Далее будет рассмотрено моделирование блока-идентификатора системы управления БПЛА в ПП Simulink и Fuzzy Logic Toolbox [3–6].

**Исследование работы нечеткого блока-идентификатора.** Блок-идентификатор (БИ) проектировался на основе систем нечеткого вывода в Fuzzy Logic Toolbox [6].

В качестве входных параметров системы нечеткого вывода будем рассматривать следующие нечеткие переменные: угол тангажа  $\vartheta$ , число Маха  $M$ , отклонение руля высоты  $\delta$ , а в качестве выходного параметра – оценка перегрузки ДПЛА  $\hat{n}_y$ . БИ моделирует зависимость (рис. 3) в соответствии с системой нечеткого вывода типа Момдами:

$$\hat{n}_y(k) = K_z M^2(k) \operatorname{sgn}(\vartheta) [\hat{a}_n |\vartheta(k)|^3 + \hat{b}_n |\vartheta(k)|^2 + \hat{c}_n (2 - M(k)/3) |\vartheta(k)|] + \hat{d}_n \delta(k), \quad (3)$$

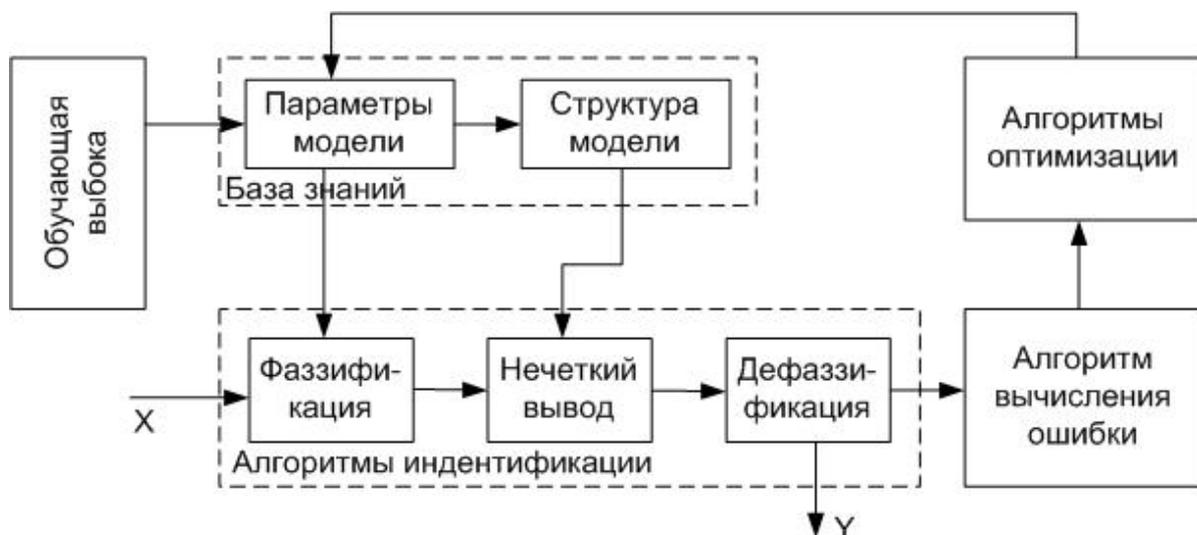


Рис. 2. Структура нечеткой модели блока идентификации

где  $\vartheta(k), M(k), \delta(k) \infty$  и  $\hat{n}_y(k)$  – значения входных и выходных переменных объекта управления в дискретные моменты времени  $k > 0$ ,  $\hat{a}_n, \hat{b}_n, \hat{c}_n, \hat{d}_n$  – аэродинамические коэффициенты ДПЛА.

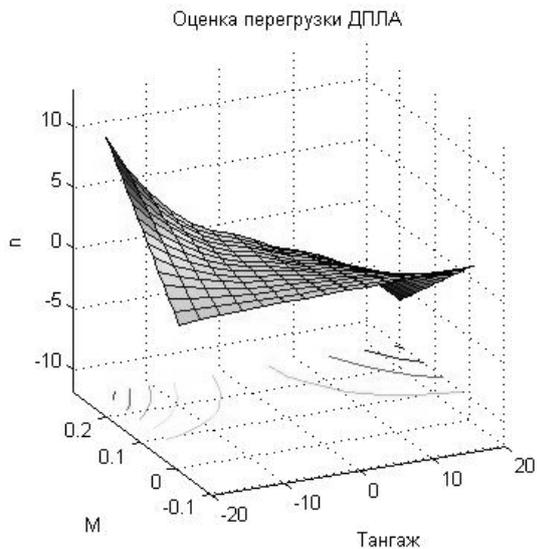


Рис. 4. Искомая зависимость: оценка перегрузки  $n_y$  ДПЛА

Область изменения входных параметров следующая:  $\vartheta \in [-20; 20]$ ,  $M \in [0; 0, 2]$ ,  $\delta \in [-20; 20]$ .

Адекватность полученной нечеткой модели проверялась по следующему критерию: найти такой вектор  $(P, W)$ , чтобы [3]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{r=1, N} (y_r - F(P, W, X_r))^2} \rightarrow \min, \quad (4)$$

где  $P$  – вектор параметров функций принадлежности термов входных и выходной переменных;  $W \in [0; 1]$  – вектор весовых коэффициентов правил базы знаний;  $N$  – пары из обучающей выборки;  $X_r$  – входные переменные;  $y_r$  – выход системы;  $F(P, W, X_r)$  – результат вывода по нечеткой базе знаний Мамдани с параметрами  $(P, W)$  при значении входов  $X_r$ .

Входы и выход нечеткой модели будем рассматривать как лингвистические переменные. Значение для переменной «угол тангажа» определяются из следующего термножества: {PH, PM, PD, C, ND, NM, BH} или {положительно высокий, положительно средний, положительно низкий, не меняется, отрицательно высокий, отрицательно средний, отрицательно низкий} для  $\vartheta$ . Термы представим нечеткими множествами с гауссовыми функциями принадлежности. Возможный вид функции принадлежности для входной лингвистической переменной «угол тангажа» приведен на рис. 4.

Далее создадим лингвистическое описание параметров нечеткой модели БИ с помощью базы нечетких правил типа

$$M_i: \text{если } X_1 \text{ есть } A_{i1} \text{ и...и } X_m \text{ есть } A_{im}, \text{ то } Y_1 \text{ есть } D_{i1} \text{ и...и } Y_n \text{ есть } D_{in}. \quad (5)$$

Для составления и отладки базы нечетких правил использовались обучающие данные перегрузки  $n_y$  (рис. 5).

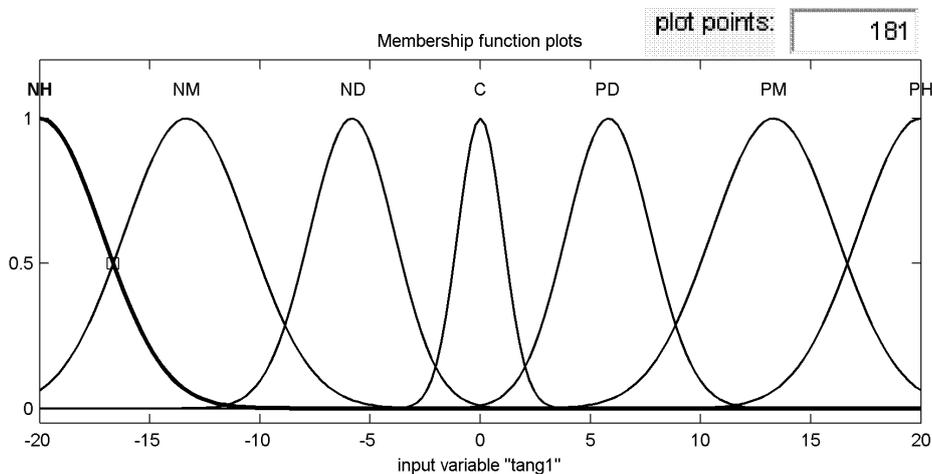


Рис. 5. Функции принадлежности переменной  $\vartheta$  в Membership Function Editor

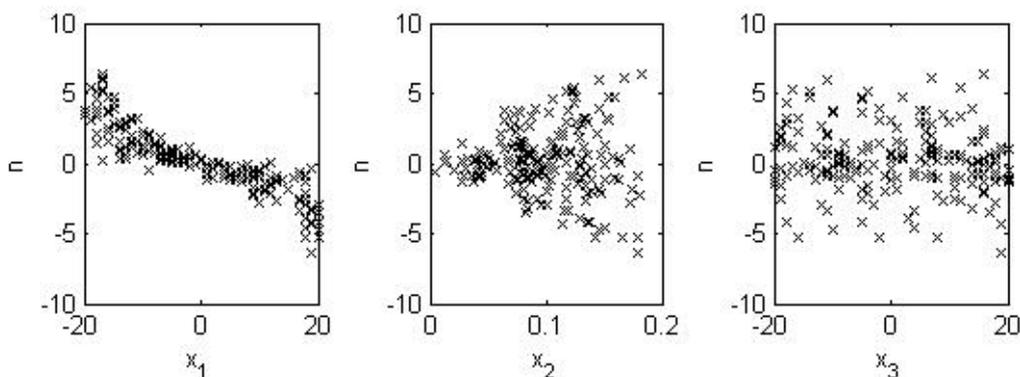


Рис. 6. Обучающая выборка для идентификации зависимости оценки перегрузки  $n_y$  от угла тангажа  $\vartheta = x_1$ , числа Маха  $M = x_2$ , отклонения руля высоты  $\delta = x_3$

После обучения нечеткой базы знаний была получена зависимость идентифицируемой перегрузки  $\hat{n}_y$  от входных переменных  $\vartheta$ ,  $M$ ,  $\delta$  (рис. 6).

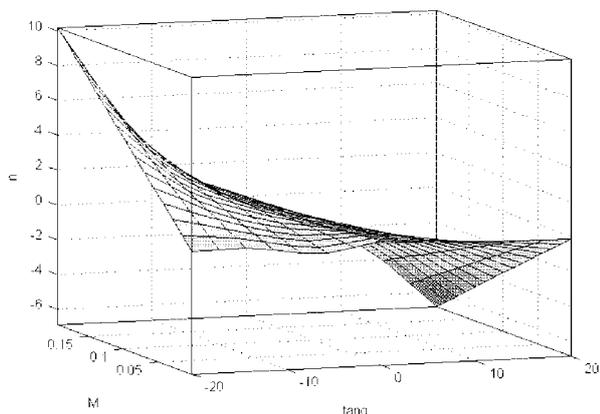


Рис. 6. Идентифицируемая перегрузка  $\hat{n}_y$ , tang – тангаж

Более наглядное сравнение экспериментальных данных из тестовой выборки с результатами нечеткого моделирования показаны на рис. 7.

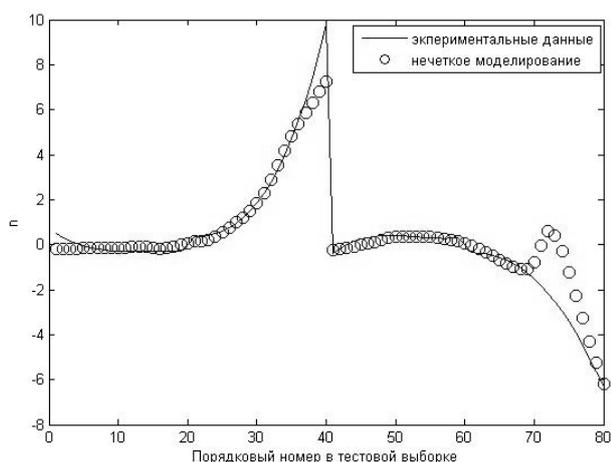


Рис. 7. Тестирование нечеткой модели БИ

Нечеткая модель описывает динамику экспериментальных данных, однако в отдельных случаях имеются значительные расхождения в оценке перегрузки  $\hat{n}_y$  (см. рис. 7). Повысим точность нечеткой модели в оценке перегрузки  $\hat{n}_y$  с помощью обучения нечеткой базы знаний.

Обучение нечеткой модели осуществим квазиньютоновским методом [5] Бройдена–Флетчера–Голфарбда–Шэнно на протяжении 300 итераций.

Определим, как влияет длительность обучения на адекватность нечеткой модели, для этого построим следующие зависимости (рис. 8, 9).

Значение невязки (6) с ростом количества итераций уменьшается, и после 200 итераций квадратичная ошибка моделирования на обучающей и 50 итераций на тестовой выборках равны 0,001 1 и 0,236 1 соответственно (см. рис. 8, 9). После этого ошибка на тестовой выборке начинает немного возрастать, и начиная примерно с 49 выборки проявляется эффект переобучения. Это объясняется тем, что вне точек обучения адекватность переобученной модели низкая – результаты моделирования сильно отличаются от экспериментальных данных, поэтому

рекомендуется прекращать обучение при возрастании ошибки на тестовой выборке.

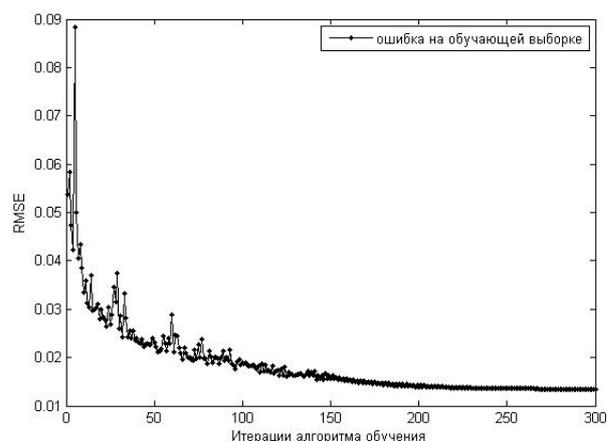


Рис. 8. Зависимость ошибок нечеткого моделирования от количества итераций обучения на обучающей выборке

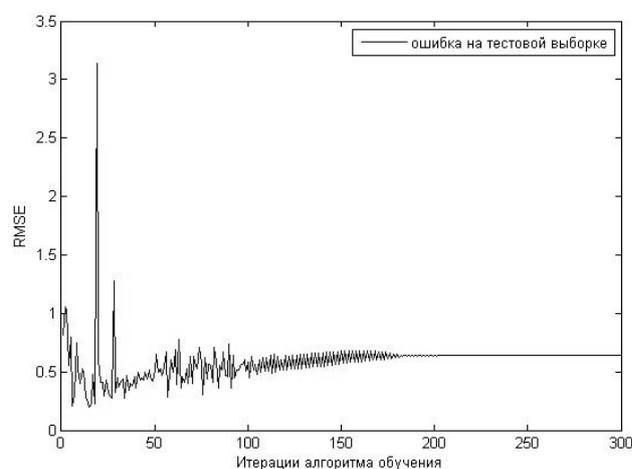


Рис. 9. Зависимость ошибок нечеткого моделирования от количества итераций обучения на тестовой выборке

После обучения и настройки нечеткой базы знаний адекватность модели заметно улучшилась (рис. 10).

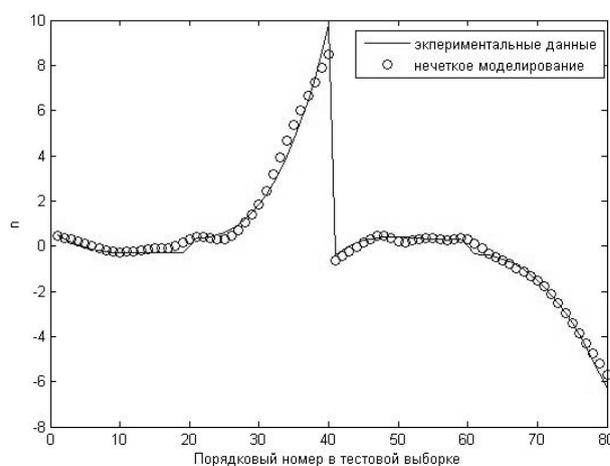


Рис. 10. Тестирование нечеткой модели БИ после настройки

**Заключение.** В результате исследования была показана целесообразность применения адаптивной эталонной

модели с блоком-идентификатором на нечеткой логике, которая обеспечивает адаптацию эталонной модели к широким изменениям режимов полета БПЛА.

#### Библиографические ссылки

1. Calise A. J. H. Lee, N. Kim. High bandwidth adaptive flight control // AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Denver, CO, 2000.
2. Ogata K. Modern control engineering. New Jersey : Prentice Hall, 1990.

3. Борисов В. В., Круглов В. В., Федулов А. С. Нечеткие модели и сети. М. : Горячая линия – Телеком, 2007.
4. Дьяконов В., Круглов В. Матлаб. Анализ, идентификация и моделирование систем. Специальный справочник. СПб. : Питер, 2001.
5. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М. : Горячая Линия – Телеком, 2007.
6. Fuzzy Logic Toolbox. User's Guide, Version 2.1 The MathWorks, Inc., 2001.

E. V. Matveev, V. A. Glinchikov

### ADAPTIVE REFERENCE MODEL IN CONTROL SYSTEM OF UNMANNED AERIAL VEHICLE

*In the paper we consider control system with application of adaptive reference model. For identification of changing parameters of object and the subsequent adaptation of a reference model the block identifier constructed with application of an indistinct logic conclusion is used.*

*Keywords: adaptive reference model, indistinct logic, identification of conditions, indistinct model learning.*

© Матвеев Е. В., Глинчиков В. А., 2010

УДК 629.78.064

П. И. Мельников, В. С. Кудряшов, В. И. Кузоро, Е. А. Шангина

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МОДУЛЬ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ С КОНЦЕНТРАТОРОМ: ИДЕЯ, КОНСТРУКЦИЯ, МЕТОДИКА ЛЕТНЫХ ИСПЫТАНИЙ\*

*Приводится описание экспериментального модуля (ЭМБС) солнечной батареи, оснащенного концентратором солнечного света в виде плоских отражателей, а также описание методики летного эксперимента на низкоорбитальном КА «Юбилейный-2».*

*Ключевые слова: космический аппарат, солнечные батареи.*

**Введение.** Очевидно, что в ближайшее десятилетие для решения прикладных задач в околоземном космосе основным источником энергии по-прежнему будут солнечные батареи. Это оправдывает усилия, направленные на поиск путей дополнительного повышения их характеристик.

Для его преодоления необходимо создание упреждающего задела. Одним из наиболее перспективных способов повышения характеристик солнечных батарей является разработка новых конструкций с концентраторами солнечного света.

Применение концентраторов обеспечивает улучшение базовых показателей солнечной батареи:

- повышение удельной мощности (Вт/м<sup>2</sup>, Вт/кг);
- снижение удельной стоимости  $S$  (руб./Вт).

Конечной целью этих усилий является достижение конкурентных преимуществ солнечных батарей (БС) для КА, разрабатываемых в ОАО «ИСС».

Для оценки практически реализуемых характеристик необходима разработка макетных образцов, проведение испытаний. Для оценки стойкости характеристик концентраторов солнечного света к факторам космического пространства (ФКП) необходимо проведение летного эксперимента [1].

В качестве первого шага по исследованию БС с концентраторами в ОАО «ИСС» было принято решение о проведении натурного эксперимента ЭМБС на КА «Юбилейный-2», запуск которого запланирован на начало 2011 г.

КА «Юбилейный-2» – микроИСЗ с одноосной системой ориентации на Землю и с неориентированной солнечной батареей. Внешний вид КА показан на рис. 1. Очевидно, что в условиях подобного КА проведение качественного летного эксперимента со статусом летной квалификации инновационных конструкций БС с концентраторами солнечного света не представляется возмож-

\*Работа выполнена при финансовой поддержке КГАУ «Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности».