

3. *Tai-Chen Chen, Yao-Wen Chang.* Multilevel Full-Chip Gridless Routing Considering Optical Proximity Correction // Proc. ASPDAC. – 2005. – P. 1160-1163.
4. *Borzorgzadeh E., Kastner R., Sarrafzadeh M.* Pattern Routing: Use and Theory for Increasing Predictability and Avoiding Coupling // Circuits and Systems. – 2002. – Vol. 21, № 7. – P. 777-790.
5. *Воронин Е.И., Лебедев Б.К.* Многоуровневый подход к решению задачи трассировки по всему чипу с использованием модификаций муравьиного алгоритма // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 7 (120). – С. 73-80.
6. *Лебедев В.Б., Шашелов А.А.* Генетический алгоритм глобальной трассировки основанный на альтернативах построения маршрута // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 7 (132). – С. 55-62.
7. *Воронин Е.И., Лебедев Б.К.* Генетический алгоритм распределения соединений по слоям при многослойной глобальной трассировке СБИС // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 7 (132). – С. 14-21.
8. *Лебедев Б.К., Шашелов А.А.* Волновой алгоритм детальной трассировки основанный на неясном графе соединений // Конгресс по интеллектуальным системам и информационным технологиям (IS&IT'12). – М.: Изд-во “Физматлит”, 2012. – Т. 3. – С. 155-160.
9. *CSE Department.* Testing and Verification of Circuits (CS60089, 3-1-0). [Online]. <http://www.facweb.iitkgp.ernet.in/~isg/TESTING/>. (Дата последнего обращения: 14.05.2013).

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Я.Е. Ромм.

Лебедев Борис Константинович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: lbk@tsure.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371743; кафедра систем автоматизированного проектирования; профессор.

Шашелов Артем Андреевич – e-mail: temant@mail.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Октябрьская, 11а, кв. 9; тел.: +79185185701; кафедра систем автоматизированного проектирования; аспирант.

Lebedev Boris Konstantinovich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: lbk@tsure.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371743; the department of computer aided design; professor.

Shashelov Artem Andreevich – e-mail: temant@mail.ru; 11a, ap.9. Oktabrskaya street, Taganrog, 347900, Russia; phone: +79185185701; the department of computer aided design; postgraduate student.

УДК 004.891

Н.А. Полковникова, В.М. Курейчик

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ НЕЧЁТКОЙ ЛОГИКИ

Рассмотрена модель экспертной системы для идентификации неисправностей динамического объекта в условиях эксплуатации. Разработана структурная схема экспертной системы с оптимальным числом диагностических параметров на основе лингвистических переменных и нечёткой логики. Нечёткая экспертная система использует представление знаний в форме нечётких продукций и лингвистических переменных. Проектирование модели экспертной системы производилось по алгоритму нечёткого логического вывода Мамдани в пакете Fuzzy Logic Toolbox вычислительной среды MATLAB. Показана реализация модуля экспертной системы на примере идентификации неисправностей главного судового двигателя. Использование аппарата нечёткой логики при разработке базы знаний и

механизмов вывода экспертной системы позволяет формализовать процедуру оценки технического состояния на базе фрагментарной, ненадёжной и возможно неточной информации и обоснованно принимать решения по идентификации неисправностей. Разработанная модель экспертной системы на основе нечёткой логики и параметров рабочего процесса и топливоподачи позволяет на ранней стадии адекватно отразить растущую вероятность неисправности при изменении входных параметров в режиме реального времени.

Нечёткая логика; лингвистическая переменная; функция принадлежности; экспертная система; система поддержки принятия решений.

N.A. Polkovnikova, V.M. Kureichik

DEVELOPMENT OF AN EXPERT SYSTEM MODEL BASED ON FUZZY LOGIC

The article describes a model of expert system for fault identification of a dynamic object in operation. The structural scheme of the expert system with the optimal number of diagnostic parameters on the basis of linguistic variables and fuzzy logic is proposed. Fuzzy expert system uses the knowledge representation in the form of products and fuzzy linguistic variables. The model design of diagnostic expert system was designed making use of Mamdani fuzzy inference algorithm as a framework along with a Fuzzy Logic Toolbox package in MATLAB computing environment. The module implementation is described for main diesel ship engine malfunction identification system. The use of fuzzy logic in development of the knowledge base and inference mechanisms of expert system allows to formalize technical condition assessment procedure based on fragmented, unreliable and possibly, inaccurate information and make reasonable decisions on fault identification. The developed model of the expert system based on fuzzy logic with workflow and fuel supply settings allows reflecting adequately the increasing probability of failure of input parameters's changing values at early stage in real time mode.

Fuzzy logic; linguistic variable; membership function; expert system; decision support system.

Введение. Развитие информационных технологий позволяет обеспечить высокий уровень функционирования информационной системы обработки данных в экспертной системе (ЭС). Экспертные системы обеспечивают поддержку принятия решений в ситуациях, для которых алгоритм заранее не известен и формируется по исходным данным в виде цепочки рассуждений (правил) из базы знаний.

Для определения технического состояния объекта применение аппарата нечёткой логики позволяет работать с существующей неопределённостью, неполнотой и нечёткостью информации. Выбор решения по числовой информации в условиях неопределённости (риска) возникает в том случае, когда с каждым принимаемым решением связано некоторое множество возможных результатов с известными условными вероятностями.

Поэтому использование аппарата нечёткой логики при разработке базы знаний и механизмов вывода экспертной системы позволяет формализовать процедуру оценки технического состояния на базе фрагментарной, ненадёжной и возможно неточной информации и обоснованно принимать решения по идентификации неисправностей. Нечёткая экспертная система использует представление знаний в форме нечётких продукций и лингвистических переменных.

Нечёткие экспертные системы позволяют не только учитывать неопределённость, но и моделировать рассуждения, что с большим трудом поддается реализации в системах на классической логике. Таким образом, основной целью использования нечёткой логики является создание аппарата, способного моделировать человеческие рассуждения и объяснять приемы принятия решений [1–5].

В работе показана реализация одного из модулей экспертной системы с применением аппарата нечёткой логики для идентификации неисправностей динамической системы (объекта) в условиях эксплуатации.

Разработка модели экспертной системы. Модель экспертной системы на базе нечёткой логики представляет собой набор продукционных правил, написанных на естественном языке качественных понятий специалистами по сложному трудноформализуемому диагностическому процессу. Нечёткие экспертные системы позволяют не только учитывать неопределенность, но и дают возможность моделировать рассуждения на основе опыта специалистов.

На рис. 1 представлена структурная схема экспертной системы на базе нечёткой логики.



Рис. 1. Структурная схема экспертной системы на базе нечёткой логики

В качестве динамической системы принимается диагностируемый объект в условиях эксплуатации, для которого определено понятие состояния как совокупности некоторых параметров в данный момент времени. Система централизованного контроля параметров (СЦК) считывает данные об объекте и предоставляет эти данные оператору. Затем оператор вводит полученные данные в экспертную систему и запускает механизм обработки.

Фаззификацией является преобразование чёткого множества входных данных в нечёткое множество, определяемое с помощью значений функций принадлежности. Целью этапа фаззификации является установление соответствия между конкретным численным значением отдельной входной переменной системы нечёткого вывода и значением функции принадлежности соответствующего ей терма входной лингвистической переменной. Входными данными $\{x_1, x_2 \dots x_i\} \in X$, где i – число диагностируемых параметров, являются значения полученные с СЦК. Затем происходит лингвистическая оценка каждого параметра в соответствии с заданными в системе функциями принадлежности. После этого чёткое множество входных параметров

превращается в нечёткое множество \tilde{A} и используется в качестве лингвистических переменных в логических правилах базы знаний. Дефазификацией является обратное преобразование нечёткого множества в чёткое множество B . Таким образом, значениями системы являются вероятности каждой неисправности $\{y_1, y_2 \dots y_j\} \in Y$, где j – число неисправностей (состояний).

Нечёткое множество представляет зависимость $\mu(x) = \mu_{\tilde{A} \rightarrow B}(y)$ как функцию от выходной переменной y . Таким образом, производится идентификация неисправностей с оценкой вероятностей. Такая система логического вывода называется системой Мамдани-Заде. Выбор нечёткой модели типа Мамдани обусловлен тем, что правила базы знаний являются прозрачными и интуитивно понятными, тогда как для моделей типа Сугэно не всегда ясно какие линейные зависимости «входы – выход» необходимо использовать и как их получить [6].

В настоящей работе структурная схема (рис. 1) была реализована при разработке модуля экспертной системы для идентификации неисправностей на примере главного судового дизельного двигателя. Предложенная структурная схема ЭС на нечёткой логике может быть применена в любых системах по определению технического состояния объекта и системах поддержки принятия решений для сложных процессов, когда нет математической модели и когда экспертные знания об объекте или процессе можно сформулировать в лингвистической форме. Например, процесс эксплуатации главных судовых дизелей характеризуется нестабильностью: переменные нагрузочные режимы, изменение внешних условий плавания, переход на разные сорта топлив, влияние человеческого фактора. Поэтому учитываемая объективно существующую неопределенность, неполноту и нечеткость информации об объекте целесообразно использовать аппарат нечеткой логики для идентификации неисправностей.

На рис. 2 представлено главное окно экспертной системы, которое содержит таблицы текущих параметров рабочего процесса и топливоподачи по цилиндрам с расчётом средних значений, эталонные параметры работы двигателя, интерактивные формы диагностики неисправностей при запуске и остановке двигателя. Вызов модуля на нечёткой логике осуществляется нажатием на кнопку «диагностика на нечёткой логике» через главное окно экспертной системы.

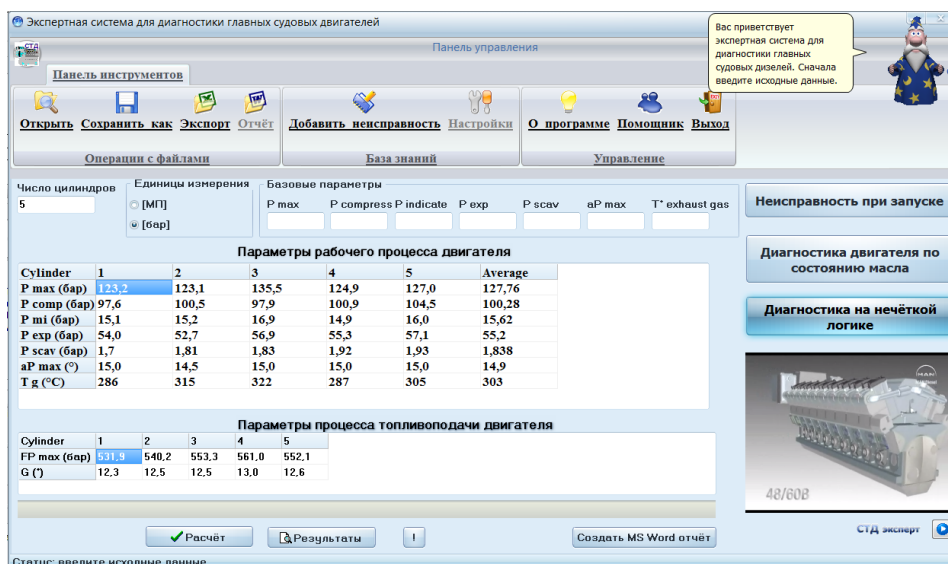


Рис. 2. Главное окно экспертной системы

Разработанная экспертная система – это интеллектуальная программа, способная давать оператору практические рекомендации по оценке технического состояния двигателя на основании логических выводов и знаний о допустимых значениях параметров рабочего процесса и топливоподачи. Таким образом, применение аппарата нечеткой логики, совместно с другими алгоритмами диагностики, позволяет максимально приблизиться к логике эксперта-специалиста и отнести разработанную экспертную систему к классу гибридных экспертных систем [7, 8].

При разработке ЭС для диагностики главных судовых дизелей значительная роль отводится созданию качественно новых систем мониторинга и использования информационных технологий для быстрой и качественной идентификации неисправностей. Самыми информативными для определения неисправностей в цилиндрах двигателя являются параметры рабочего процесса и топливоподачи, которые получают в результате индицирования с помощью таких зарубежных микропроцессорных систем, как Autronika NK-200 (Норвегия), PMI System Pressure Analyser (Германия), Maline 6000 (Англия) [9, 10, 11].

При разработке базы знаний экспертной системы были использованы результаты индицирования, которые были преобразованы в три диапазона значений параметров соответственно для трёх лингвистических переменных: низкое, нормальное и высокое (табл. 1).

Таблица 1

Значения параметров в каждом диапазоне

Наименование параметра	Обозн.	Значение параметров		
		низкое	нормальное	высокое
Среднее индикаторное давление, бар	p_{mi}	[15...15,6]	[15,6...16,4]	[16,4...17]
Максимальное давление в цилиндре, бар	p_{max}	[130...141,5]	[141,5...148,5]	[148,5...160]
Давление на линии расширения при угле 36° за ВМТ	p_{exp}	[55...63]	[63...67]	[67...75]
Температура выпускных газов, °C	t_r	[270...285]	[285...315]	[315...330]
Максимальное давление в топливопроводе высокого давления, бар	Fp_{max}	[500...520]	[520...580]	[580...600]

Значения параметров для диапазона лингвистической переменной рассчитаны исходя из допустимых отклонений параметров от средних значений в соответствии с правилами технической эксплуатации.

Из табл. 1 следует, что для среднего индикаторного давления возможные значения составляют следующее множество:

$$p_{mi} = (15; 15,3; 15,6; 16; 16,4; 16,6; 17). \quad (1)$$

Каждому элементу множества соответствует своя степень принадлежности: чем выше степень принадлежности, тем больше вероятность того, что значение параметра в норме. Функции принадлежности или информация для их построения задаются экспертами на основе субъективных предпочтений и не носят случайного характера. Полученное нечёткое множество будет в следующем виде:

$$\tilde{A}_{p_{mi}} = \left(\frac{0}{15}, \frac{0,3}{15,3}, \frac{1}{15,6}, \frac{1}{16}, \frac{1}{16,4}, \frac{0,5}{16,6}, \frac{0}{17} \right). \quad (2)$$

Так как множество параметра p_{mi} является конечным и содержит 7 элементов, то нечёткое множество \tilde{A} записывается так:

$$\tilde{A}_{p_{mi}} = \sum_{i=1}^7 \frac{\mu_A(Pmi_i)}{Pmi_i}, \quad (3)$$

где $\mu_A(Pmi_i)$ – степень принадлежности элемента $Pmi_i \in Pmi$ нечёткому множеству \tilde{A} . Степень принадлежности – это число из диапазона $[0, 1]$. Чем выше степень принадлежности, тем большей мерой элемент множества соответствует свойствам нечёткого множества.

Для максимального давления возможные значения составляют следующее множество:

$$p_{max} = (130; 140; 141,5; 145; 148,5; 155; 160). \quad (4)$$

Полученное нечёткое множество имеет вид:

$$\tilde{A}_{p_{max}} = \left(\frac{0}{130}, \frac{0,6}{140}, \frac{1}{141,5}, \frac{1}{145}, \frac{1}{148,5}, \frac{0,3}{155}, \frac{0}{160} \right), \quad (5)$$

тогда нечеткое множество \tilde{A} для параметра p_{max} записывается так:

$$\tilde{A}_{p_{max}} = \sum_{i=1}^7 \frac{\mu_A(Pmax_i)}{Pmax_i}. \quad (6)$$

С учётом всех остальных параметров, данную систему можно отнести к типу MISO (Multiple Input Single Output): несколько входов – один выход. В этом случае система зависит от значений всех входных параметров, и будет описываться правилами, в которых учитываются все входные параметры системы. Обобщённая запись полученной MISO системы выглядит следующим образом:

$$y = [\tilde{A}_{p_{mi}} \wedge \tilde{A}_{p_{max}} \wedge \tilde{A}_{p_{exp}} \wedge \tilde{A}_{t_r} \wedge \tilde{A}_{p_c} \wedge \tilde{A}_{f_{p_{max}}}], \quad (7)$$

В модели экспертной системы входными переменными являются пять параметров: p_{mi} , p_{max} , p_{exp} , t_r , $f_{p_{max}}$, так как при большем количестве входов эксперту сложнее описать нечёткими правилами причинно-следственные связи. Это обусловлено тем, что в оперативной памяти человека может одновременно храниться не более 7 ± 2 понятий-признаков. Следовательно, количество входных переменных в одной базе знаний не должно превышать это число. Опыт исследователей показывает, что хорошие базы знаний получаются, когда количество входов не превышает пяти [12]. Поэтому для пяти входных переменных была составлена структурная схема для модели нечеткой экспертной системы в пакете Fuzzy Logic Toolbox вычислительной среды MATLAB 7. Специальные средства нечеткого моделирования в MATLAB позволяют выполнять весь комплекс исследований по разработке и применению нечетких моделей [13, 14]. Именно по этим причинам система MATLAB была выбрана в качестве программного средства, в рамках которого можно реализовать теоретические концепции нечетких множеств и процедуры нечеткого вывода.

На рис. 3 представлена структурная схема диагностики цилиндра в окне редактора системы нечёткого вывода MATLAB 7. Входами являются перечисленные выше параметры цилиндра, полученные в результате индицирования главного двигателя. Выходами являются вероятные неисправности цилиндра, характерные для данных входных параметров.

Цилиндр может иметь следующие состояния: перегружен, недогружен, неисправность топливной аппаратуры (ТА), потеря плотности, норма.

Фаззификация входных параметров. Процесс задания нечёткого множества на основе известного количественного значения признака называется фаззификацией или приведением к нечёткости. Фаззификация – это также процесс нахождения значений функций принадлежности нечётких множеств на основе обычных (не нечётких) исходных данных. Фаззификация позволяет представить объективно присутствующую неточность результатов физических измерений.

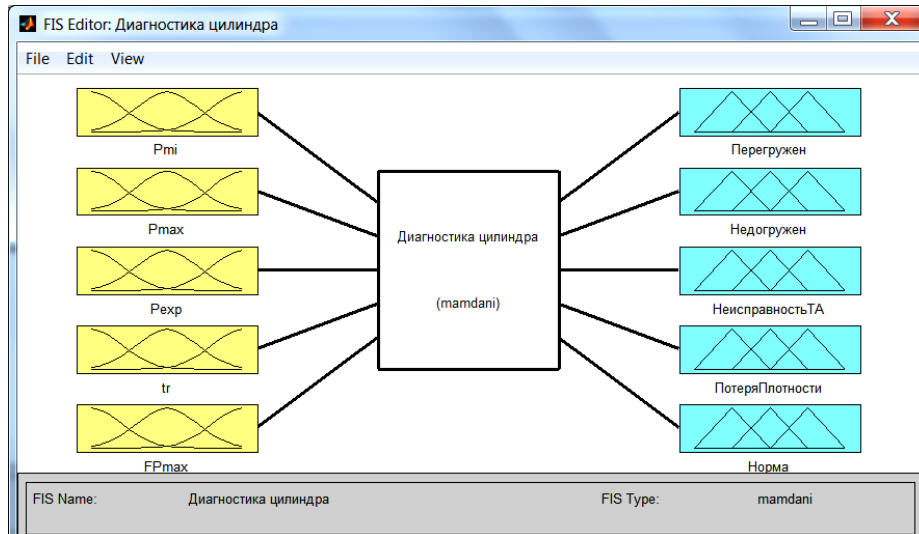


Рис. 3. Функциональная схема идентификации неисправностей в окне редактора MATLAB

На этапе фаззификации значения входных параметров приводятся в соответствии с их нечеткими лингвистическими переменными (табл. 1) с последующим выбором закона изменения функции принадлежности.

Для каждого входного параметра был задан трапециевидный закон изменения функции принадлежности. Функции принадлежности являются нормальными (нормированными), принимающими значения в интервале от 0 до 1. Полученные графики на примере параметра p_{mi} представлены на рис. 4.

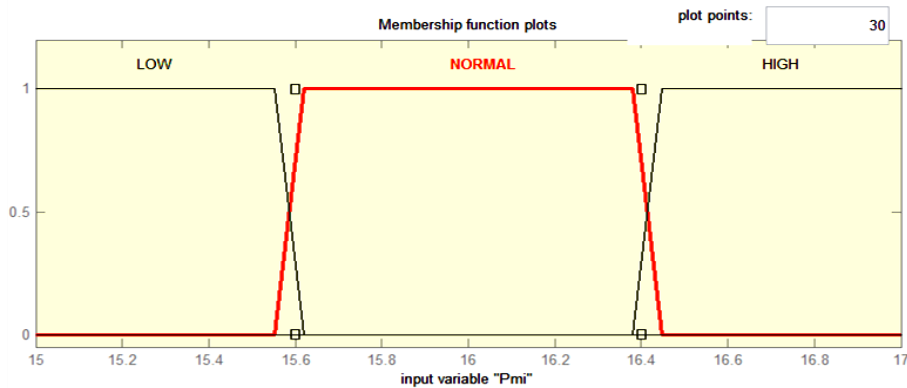


Рис. 4. Функциями принадлежности переменной p_{mi}

Каждый параметр имеет свой диапазон изменения. Лингвистическая оценка значения каждой переменной производится с помощью 3 термов: low (низкое), normal (нормальное), high (высокое). Функция принадлежности имеет трапециевидную форму: $y = \text{trapezmf}(x, [a, b, c, d])$, где аргумент a – минимальное допустимое значение параметра с нулевой вероятностью нормы, отрезок между аргументами $[b, c]$ показывает принадлежность параметра к норме с вероятностью 1. И соответственно аргумент d – максимальное допустимое значение параметра с нулевой вероятностью нормы.

Низким значением для параметра p_{mi} (см. рис. 4) является диапазон [15 15,6], нормальным – [15,6 16,4] и высоким – [16,4 17]. Минимальным значением p_{mi} принято 10 бар. Выбор трапецевидной формы функции принадлежности обусловлен тем, что принадлежность параметра к норме с вероятностью 1 определяется не одним единственным значением переменной, а некоторым диапазоном из допустимых значений.

Для параметра p_{mi} (рис. 4) функции принадлежности имеют три качественных представления, механизм нечеткого логического вывода которых математически формализован в следующем виде:

$$\mu_{low}(p_{mi}) = \begin{cases} 1 & p_{mi} \in [15 \ 15,6] \\ 1 - \frac{p_{mi}-15,5}{15,6-15,5} & p_{mi} \in [15,5 \ 15,6] \\ 0 & p_{mi} \in [10 \ 15] \vee p_{mi} > 15,6 \end{cases} \quad (8)$$

$$\mu_{normal}(p_{mi}) = \begin{cases} \frac{p_{mi}-15,5}{16-15,5} & p_{mi} \in [15,5 \ 16] \\ 1 & p_{mi} \in [15,6 \ 16,4] \\ 1 - \frac{p_{mi}-16}{16,5-16} & p_{mi} \in [16 \ 16,5] \\ 0 & p_{mi} \in [10 \ 15,4] \vee p_{mi} > 16,5 \end{cases} \quad (9)$$

$$\mu_{high}(p_{mi}) = \begin{cases} \frac{p_{mi}-16,3}{16,5-16,3} & p_{mi} \in [16,3 \ 16,5] \\ 1 & p_{mi} \in [16,5 \ 17] \\ 0 & p_{mi} < 16,3 \end{cases} \quad (10)$$

После завершения этапа фаззификации для всех входных переменных определены конкретные значения функций принадлежности по каждому из лингвистических термов, которые используются в условиях «если параметр N is (low / normal / high)» базы правил системы нечеткого вывода.

Решение задачи с использованием правил нечеткой логики. Для идентификации неисправностей отдельных цилиндров ГД разработана диагностическая матрица и алгоритмы, в соответствии с которыми значения контролируемых параметров отдельных цилиндров сравниваются с их средними арифметическими значениями. Признак неисправности отдельного цилиндра двигателя будет иметь место, если хотя бы одно отклонение параметра превышает установленные допустимые пределы. Идентификация неисправности производится по соответствующему набору признаков.

Причинно-следственные связи между значениями параметров и неисправностью формализуются в виде совокупности нечётких логических правил. Формат базового правила вывода «если – то» (if – then) называется нечёткой импликацией. Условием правила может быть утверждение « p_{max} низкое», где «низкое» – терм заданный нечётким множеством на универсальном множестве лингвистической переменной p_{max} . Следствием (заключением) для данного условия может быть «потеря плотности цилиндра». Данную импликацию можно записать в виде: « p_{max} низкое» → «потеря плотности цилиндра».

Нечёткая база знаний с информацией о зависимости «значение параметров – неисправность» содержит лингвистические правила, например, правило для идентификации неисправности топливной аппаратуры формализовано в базе знаний следующим образом:

If (p_{mi} is low) and (p_{max} is low) and (p_{exp} is high) and (t_r is high) and ($F_{p_{max}}$ is low) then (Неисправность ТА is high) (Недогружен is low) (Норма is low) (Перегружен is low).

Дефазификация. На данном этапе происходит решение задачи обратной фазификации: преобразование лингвистических переменных входных параметров в значение конкретной неисправности. После индицирования двигателя оператор вводит полученные значения параметров, например: $p_{mi} = 15,4$ бар, $p_{max} = 138$ бар, $p_{exp} = 71,4$ бар, $t_r = 322$ C°, $Fp_{max} = 510$ бар. Затем редактор нечеткого логического вывода определяет неисправность цилиндра. Вероятность наличия неисправности определяется в диапазоне $[0 \ 1]$. В рассмотренном примере неисправность топливной аппаратуры определена с вероятностью 0,9.

Также по результатам нечёткого логического вывода получена поверхность «входы-выход», отображающая динамику развития неисправности топливной аппаратуры (рис. 5). Поверхность отображает вероятность неисправности топливной аппаратуры при изменении входных параметров p_{mi} и p_{max} . Вероятность неисправности топливной аппаратуры достигает максимального значения 0,75...1 при параметрах: $p_{max} = 130 \dots 140$ бар и $p_{mi} = 15 \dots 16$ бар.

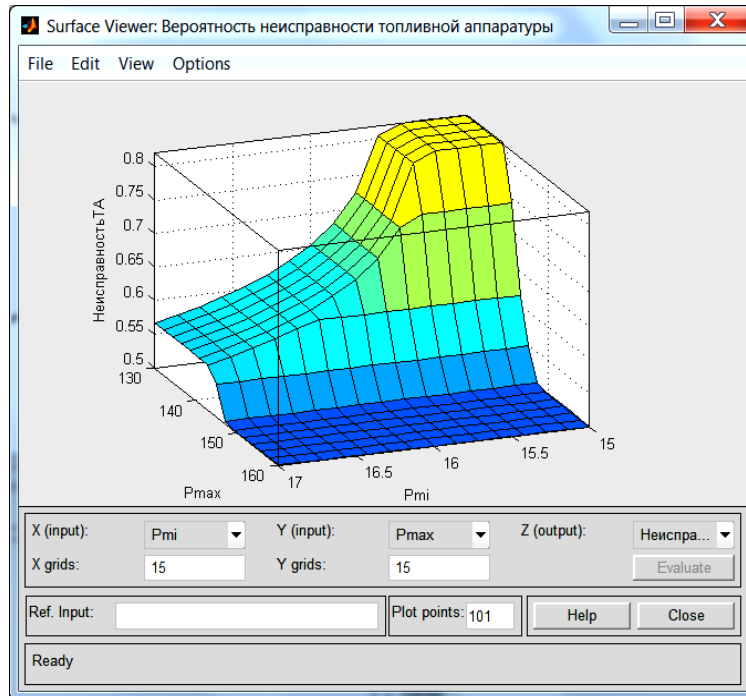


Рис. 5. Синтезированная поверхность «входы-выход» при неисправности топливной аппаратуры

Заключение. Разработанная модель экспертной системы на основе нечеткой логики и параметров рабочего процесса и топливоподачи позволяет на ранней стадии адекватно отразить растущую вероятность неисправности при изменении входных параметров в режиме реального времени.

Преимущества проектирования модели экспертной системы на основе нечеткой логики заключаются в следующем:

- 1) поддержка разработки быстрого прототипа экспертной системы с последующим усложнением функциональности;
- 2) нечеткая логическая модель более понятна для оператора, чем аналогичная математическая модель на основе дифференциальных уравнений;

3) метод нечетких множеств позволяет включать в анализ качественные переменные, оперировать нечеткими входными данными и лингвистическими критериями;

4) нечеткие модели оказываются более простыми для реализации по сравнению с классическими алгоритмами управления техническими системами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Zadeh L.A.* Is there a need for fuzzy logic? // *Information Sciences*, Elsevier– 2008. – № 178. – P. 2751-2779.
2. Интеллектуальные системы: коллективная монография. Вып. 3 / Редкол.: В.М. Курейчик и др. – М.: Физматлит, 2009. –196 с.
3. *Курейчик В.М.* Особенности построения систем поддержки принятия решений // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2012. – № 7 (132). – С. 92-98.
4. *Курейчик В.В., Курейчик В.М., Ковалев С.М.* Оптонечёткие системы // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2009. – № 4 (93). – С. 99-105.
5. *Глушань В.М., Карелин В.П., Кузьменко О.Л.* Нечёткие модели и методы многокритериального выбора в интеллектуальных системах поддержки принятия решений // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2009. – № 4 (93). – С. 106-113.
6. *Deyi Li, Yi Du.* Artificial intelligence with uncertainty. Tsinghua University, Beijing, China. Chapman & Hall / CRC, 2008. – 347 p.
7. *Полковникова Н.А.* Проектирование гибридной экспертной системы поддержки принятия решений // В сб. тез. докл. II Всероссийского конгресса молодых учёных (9–12 апреля 2013 г.). – СПб.: НИУ ИТМО, 2013. – Вып. I. – С. 46-48.
8. *Курейчик В.М., Полковникова Н.А.* Разработка гибридной экспертной системы для главных судовых дизелей // Сб. докладов XVI Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям SCM–2013 (23–25 мая 2013 г.). – СПб., 2013. – С. 270.
9. <http://www.autronicafire.no> (дата обращения 02.11.13).
10. <http://www.mandieselturbo.com/1002051/Press/Publications/Technical-Papers/Supplementary/Data-and-Software/PMI-System-Pressure-analyser.html> (дата обращения 02.11.13).
11. <http://www.malin.co.uk/malin6000/malin6000.html> (дата обращения 02.11.13).
12. *Miller G.A.* The magic number seven plus or minus two: some limits on our capacity for processing information // *Psychological review.* – 1956. – № 63. – P. 81-97.
13. *Пегат А.* Нечёткое моделирование и управление: Пер. с англ. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 798 с.
14. *Sivanandam S.N., Sumathi S., Deepa S.N.* Introduction to fuzzy logic using MATLAB. Springer, 2007. – 441 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Я.Е. Ромм.

Полковникова Наталья Анатольевна – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: natalia-polkovnikova@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 89525617317; кафедра дискретной математики и методов оптимизации; аспирантка.

Курейчик Виктор Михайлович – e-mail: kur@tgn.sfedu.ru; тел.: 88634393260; кафедра дискретной математики и методов оптимизации; зав. кафедрой; д.т.н., профессор.

Polkovnikova Natalia Anatolievna – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education «Southern Federal University»; e-mail: natalia-polkovnikova@mail.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79528703037; the department of discrete mathematics and optimization methods; postgraduate student.

Kureichik Victor Mikhailovich – e-mail: kur@tgn.sfedu.ru; phone: +78634393260; the department of discrete mathematics and optimization methods; head of department; dr. of eng. sc.; professor.