



Технологическая настройка сельскохозяйственных машин на основе нечеткой логики

В. П. Димитров*, **Л. В. Борисова**, **А. К. Тугенгольд**,
И. Н. Нурутдинова

*ФГБОУ ВО «Донской государственный технический
университет» (г. Ростов-на-Дону, Россия)*

**kaf-qm@donstu.ru*

Введение. Поиск оптимальных значений регулируемых параметров зерноуборочного комбайна в полевых условиях является нетривиальной задачей. Повысить уровень качества уборочных работ можно одновременным совершенствованием конструкции машины и внедрением интеллектуальных автоматизированных систем на основе нечеткого управления. В работе рассматривается задача информационной поддержки при принятии решений о предварительной технологической настройке сложных уборочных машин, функционирующих в постоянно меняющихся полевых условиях. Объект исследования – зерноуборочный комбайн.

Материалы и методы. При проведении технологической настройки комбайна в процессе уборки анализировалась поступающая количественная, качественная и оценочная информация. Для нахождения оптимальных начальных значений регулируемых параметров применялись логико-лингвистический подход и математический аппарат нечеткой логики. Основой механизма логического вывода решений послужила композиция нечетких отношений семантических пространств внешних факторов и регулируемых параметров машины. Предлагаемая схема принятия решений, основанная на нечетких экспертных знаниях, включает этапы фаззификации, композиции и дефаззификации. Для вычислений использовалась среда MATLAB, в частности, пакет прикладных программ Fuzzy Logic Toolbox.

Результаты исследования. Рассмотрены вопросы создания базы экспертных знаний, количественной оценки согласованности экспертной информации, предназначенной для дальнейшего дедуктивного вывода решений в различных задачах предварительной настройки. Предложенная схема принятия решений проиллюстрирована на примере выбора значений одного из наиболее важных регулируемых параметров – частоты вращения крыла вентилятора очистки. Построены модели факторов внешней среды и регулируемых параметров комбайна в виде семантических пространств и соответствующих им функций принадлежности. Обобщенная модель предметной области имеет вид:

$$R = X \rightarrow Y,$$

где R – нечеткое отношение «факторы внешней среды – параметры регулировки» $R\{X_i, T(X_i), U, G, M\} \times \{Y_j, T(Y_j), U, G, M\}$; $\forall (x, y) \in X \times Y$; X_i и Y_i – наименования лингвистических переменных; T – множество значений лингвистической переменной, или термов, представляющих собой наименования нечетких переменных, определенных на множестве U ; G – синтаксическая процедура, описывающая процесс образования из множества T новых значений лингвистической переменной; M – семантическая процедура, позволяющая отобразить каждое новое значение, образуемое процедурой G , в нечеткую переменную. Создана база продукционных правил для нечеткого логического вывода и приведен ее фрагмент для одной из сельскохозяйственных культур.

Обсуждение и заключения. Применение логико-лингвистического подхода к решению задачи предварительной настройки машин дает возможность учета всех видов поступающей о внешней среде информации: количественной, качественной, эвристической. Это обеспечивает максимальную адекватность описания реальных условий уборки и, соответственно, оптимальность принятых на основе экспертной информации решений о параметрах настройки.

Ключевые слова: молотилка комбайна, вентилятор очистки, технологическая настройка, экспертные знания, нечеткое множество, лингвистическое описание, нечеткий логический вывод, фаззификация, композиция, дефаззификация

Для цитирования: Технологическая настройка сельскохозяйственных машин на основе нечеткой логики / В. П. Димитров [и др.] // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 2. С. 239–254. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.239-254>

Technological Adjustment of Agricultural Machines Based on Fuzzy Logic

V. P. Dimitrov*, L. V. Borisova, A. K. Tugengold,
I. N. Nurutdinova

Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russia)

**kaf-qm@donstu.ru*

Introduction. The search for optimal values of the adjustable parameters of a combine harvester in the field is a complex challenge. Both improving the design of the machine and using of automated systems based on fuzzy control increases the quality of harvesting. The article describes information support for the preliminary technological adjustment of complex harvesting machines that operate in changing field conditions. The object of research is a combine harvester.

Materials and Methods. We analyzed the quantitative, qualitative and estimated information during the technological adjustment of the harvesting machine. We used a logical-linguistic approach and a mathematical apparatus of fuzzy logic to find the optimal values of the parameters. The composition of fuzzy relationships between the semantic spaces of external factors and the controlled parameters of the machine was used as the basis of the mechanism for the logical derivation of solutions. The developed paradigm of decision-making based on fuzzy expert knowledge includes the stages of fuzzification, composition and defuzzification. MATLAB environment and Fuzzy Logic Toolbox software were used for calculations.

Results. The questions of creation of the expert knowledge base, a quantitative evaluation of the consistency of expert information intended for further deductive inference of solutions in various problems of preliminary tuning are considered. The proposed decision-making scheme is illustrated by the example of selecting the values of the rotation frequency of the separator fan. This is one of the most important adjustable parameters. Models of environmental factors and adjustable parameters of the combine are constructed in the form of semantic spaces and their corresponding membership functions. The generalized domain model has the form:

$$R = X \rightarrow Y,$$

where R is the fuzzy relation “environmental factors – adjustment parameters” $R\{X_i, T(X_i), U, G, M\} \times \{Y_j, T(Y_j), U, G, M\}$; $\forall(x, y) \in X \times Y$; X_i and Y_i are linguistic variables; T is plurality of values of the linguistic variable, or terms, which are here fuzzy variables defined on a plurality of U ; G is syntactic procedure describing the process of formation of a plurality of T new values of the linguistic variable; M is a semantic procedure that allows each new value generated by procedure G to be displayed in a fuzzy variable. A database of production rules for fuzzy inference is created and its fragment is given for one of the crops.



Conclusions. Application of the logical-linguistic approach to solving the problem of preliminary tuning of machines makes it possible to take into account all types of quantitative, qualitative and heuristic information about the external environment. This ensures the maximum adequacy of the description of the actual harvesting conditions and the optimality of the decisions taken on the settings based on expert information.

Keywords: combine thresher, separator fan, technological adjustment, expert knowledge, fuzzy set, linguistic description, fuzzy inference, fuzzification, composition, defuzzification

For citation: Dimitrov V. P., Borisova L. V., Tugengold A. K., Nurutdinova I. N. Technological Adjustment of Agricultural Machines Based on Fuzzy Logic. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(2):239–254. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.239-254>

Введение

Поиск оптимальных значений регулируемых параметров зерноуборочного комбайна в полевых условиях является нетривиальной задачей. Трудность ее решения обусловлена не только вариабельностью внешних условий, но и сложностью взаимосвязей «факторы среды – регулируемые параметры машины». Точные значения внешних факторов неизвестны, их оценки носят экспертный или качественный характер, а закономерности между регулируемыми параметрами и факторами внешней среды известны только приближенно. В результате решения, принятые оператором по управлению уборочной машиной, могут быть неоптимальными, что повлечет за собой прямые потери зерна, а также его механическое повреждение, увеличение простоя машины и сроков уборки урожая из-за длительного поиска причины нарушения технологического процесса¹. Все это приводит к увеличению себестоимости зерна и его биологическим потерям.

Одним из основных рабочих органов комбайна, определяющим качество уборки, является молотилка. Неверно выбранные параметры работы молотилки приводят к ухудшению показателей

качества уборки. Важнейший процесс в работе молотилки – очистка зернового вороха. Среди регулируемых параметров данного агрегата наиболее важным и часто используемым является частота вращения крыла вентилятора очистки [1]. Значимость рассмотрения данного параметра обусловлена его влиянием на ряд показателей качества работы зернокомбайна в целом². При неверном выборе значений могут наблюдаться такие отклонения показателей качества работы как повышенные потери свободного зерна с половой, засоренность зерна в бункере, повышенные потери зерна в необмолоченном колосе с половой (недомолот в полове) и др.

Задача технологической настройки рабочих органов комбайна предполагает принятие решения в нечетких внешних условиях, при наличии сложных и часто неоднозначных взаимосвязей признаков с размытыми границами, а также высказываний с различной степенью истинности.

В работе рассматривается задача конструирования процедур принятия решений на основе нечеткой исходной информации. Объект исследования – зерноуборочный комбайн, функционирующий в сложных полевых условиях.

¹ Рыбалко А. Г. Особенности уборки высокоурожайных зерновых культур (настройка и регулировка машин) : учеб. пособие. М. : Агропромиздат, 1988. 118 с. URL: <http://search.rsl.ru/ru/record/01001410620>

² Димитров В. П., Борисова Л. В. Теоретические и прикладные аспекты разработки экспертных систем для технического обслуживания машин. Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2007. 202 с.

Обзор литературы

Задача технологической настройки уборочной техники в ряде работ [1–4] решалась с помощью методов математического моделирования с использованием регрессионных моделей. В них используются эмпирические формулы, полученные в результате обработки экспериментальных данных. Например, в статье [4] получены эмпирические зависимости показателей качества, таких как потери за комбайном, потери за молотилкой, дробление зерна, сорная примесь. В числе внешних факторов учитывались влажность соломы, масса 1 000 зерен, скорость комбайна, урожайность и влажность зерна. Однако данный подход не получил значительного распространения.

Очевидно, что невозможно достаточно точно описать свойства технологического процесса, используя заранее построенные регрессионные модели. Достоверность прогноза на основе таких моделей определяется достоверностью значений входных факторов, колебания которых в условиях эксперимента сведены к минимуму, что ставит под сомнение применимость самой модели в реальных условиях. Кроме того, в подобных моделях необходимо учитывать корреляцию факторов; при этом определить экспериментальным путем влияние одного из факторов при фиксированных значениях других – достаточно сложная, а иногда и невозможная задача. В результате имеющиеся корреляционно-регрессионные модели представляют собой громоздкие математические конструкции, не всегда верно отражающие действительность, и их использование в реальном времени в условиях уборки урожая затруднено. Авторы предлагаемых моделей также отмечают этот факт и рекомендуют использовать уравнения только для оценочных процедур.

Повысить уровень качества уборочных работ можно одновременным совершенствованием конструкции машины и внедрением интеллектуальных

автоматизированных систем на основе нечеткого управления [5]. Интеллектуальные информационные системы (ИИС) аккумулируют различные виды знаний, включая экспертные и эвристические, используют накопленный опыт работы в разных, в т. ч. экстремальных, условиях. Использование ИИС позволяет быстро реагировать на изменяющиеся условия работы и в значительной степени снижает информационную нагрузку на оператора. Подобные системы используются в сельскохозяйственном производстве, в основном в связи с анализом изображений, погодных условий, переработкой или сортировкой продукции, идентификацией сорняков, оценкой урожая и т. д. [6–7].

В других работах были исследованы вопросы автоматического выбора некоторых параметров функционирования комбайна на основе показателей качества с использованием продукционных правил, сформированных на основе экспертных знаний [8–9].

Материалы и методы

Приведем методику решения задачи выбора начальных значений регулируемых параметров и проиллюстрируем ее на примере выбора значения одного из основных параметров – частоты вращения крыльча вентилятора очистки. Известно, что решение задачи на основе нечеткого управления содержит три этапа: фаззификацию, композицию и дефаззификацию [10–11].

Этап фаззификации включает ряд подзадач: определение носителя, выбор базового терм-множества, проверка требований к построению функций принадлежности (ФП), определение метода построения ФП, оценка согласованности нечетких экспертных знаний, построение обобщенной ФП.

В результате фаззификации исследуемой предметной области было произведено лингвистическое описание условий задачи, а также определены ФП регулируемых параметров и внешних факторов. При этом рассматрива-



лись нормальные нечеткие множества, для которых высота, т. е. верхняя граница ФП равна 1, ($\sup \mu_A(x) = 1$). Нечеткие множества могут быть как уни-
 модальными, т. е. ($\mu_A(x) = 1$) только на одном x из E , так и имеющими область толерантности.

На основе методологии лингвистического подхода к изучению сложных технических систем [9] нами были построены модели факторов внешней среды (признаки X) и регулируемых параметров комбайна (признаки Y) в виде семантических пространств и соответствующих им ФП:

$$\begin{aligned} & \{X_i, T(X_i), U, G, M\}, \\ & \mu_R(x_1, x_2, \dots, x_i) \in (0; 1); \\ & \{Y_j, T(Y_j), U, G, M\}, \\ & \mu_R(y_1, y_2, \dots, y_j) \in (0; 1), \end{aligned}$$

где X_i и Y_i – наименования лингвистических переменных (ЛП); T – множество значений ЛП, или термов, представляющих собой наименования нечетких переменных, определенных на множестве U ; G – синтаксическая процедура, описывающая процесс образования из множества T новых значений ЛП; M – семантическая процедура, позволяющая отобразить каждое новое значение, образуемое процедурой G , в нечеткую переменную.

Обобщенная модель предметной области «предварительная настройка» имеет вид композиции нечетких отношений рассматриваемых семантических пространств:

$$R = X \rightarrow Y,$$

где R – нечеткое отношение «факторы внешней среды – параметры регулировки»,

$$\begin{aligned} & R\{X_i, T(X_i), U, G, M\} \cdot \\ & \cdot \{Y_j, T(Y_j), U, G, M\}; \forall (x, y) \in X \cdot Y. \end{aligned}$$

Множество факторов внешней среды и регулируемых параметров характеризуется соответствующими ЛП. Необходимо определить базовые термножества для всех ЛП. В общем случае такое множество имеет вид³:

$$T_i = \{T_1^i, T_2^i, \dots, T_m^i\}, \quad (i \in K = \{1, 2, \dots, l\}),$$

где $\langle T_i, X; \tilde{C}_i \rangle$ – нечеткая переменная, соответствующая терму $T_i \in T$; $\tilde{C}_i = \{\langle \mu_{C_i}(x) / x \rangle \mid x \in X$; C_i – носитель нечеткого множества C_i ; $\mu_{C_i}(x)$ – функция принадлежности. В качестве носителя используется подмножество значений ЛП. Базовое термножество формируется на основе экспертных суждений.

Значимым этапом является выбор метода построения ФП. В моделях принятия решений на основе нечеткой экспертной информации применяются метод экспертных оценок, метод парных сравнений, метод деления значений ФП пополам, использование набора стандартных функций и др.

Представление ФП с помощью стандартных функций, задаваемых параметрически, является наиболее предпочтительным. Вид функции задается аксиоматически, а ее параметры оцениваются экспертами, что обеспечивает удобство и простоту построения. Например, в случае треугольной формы ФП указываются параметры x_1, x_2, x_3 , при которых она принимает единичное и нулевые значения, т. е. $\mu_A(x_2) = 1$ и для всех $x_3 \leq x \leq x_1$ имеет место $\mu_A(x) = 0$. Вместе с тем использование данного представления предусматривает проверку соответствия типовых форм (треугольной, трапециевидной и др.) внешним условиям. Основанием для выбора

³ Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / А. Н. Аверкин [и др.]; под ред. Д. А. Поспелова. М.: Наука, 1986. 312 с.

конкретного вида ФП служат различные предположения о таких свойствах данных функций как симметричность, монотонность и т. д.; учитывается специфика неопределенности, а также ее физический смысл.

Согласованность экспертной информации определяется несколькими критериями. К показателям парной согласованности относятся показатель d_{ij}^l различия моделей двух экспертов (i -го и j -го) в рамках l -го термина, который определяется как расстояние Хемминга⁴ между нечеткими множествами с функциями принадлежности $\mu_{ij}(x)$ и $\mu_{ji}(x)$, и показатель согласованности k_{ij}^l [12]:

$$d_{ij}^l = \int_0^1 |\mu_{il}(x) - \mu_{jl}(x)| dx,$$

$$k_{ij}^l = \frac{\int_0^1 \min[\mu_{il}(x), \mu_{jl}(x)] dx}{\int_0^1 \max[\mu_{il}(x), \mu_{jl}(x)] dx}. \quad (1)$$

Величины d_{ij}^l и k_{ij}^l образуют матрицы нечеткости D^l и парной согласованности K^l в рамках l -го термина. На основе этих матриц, полученных для каждого из термов, находятся матрицы нечеткости D и парной согласованности K моделей по всем термам. Их элементы определяются формулами [13]:

$$d_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m d_{ij}^l, \quad k_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m k_{ij}^l, \quad (2)$$

где m – число термов.

Для характеристики общей согласованности множества моделей экспертного оценивания признака вычисляют аддитивный k и мультипликативный \tilde{k} показатели [12]:

$$k = \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m \frac{\int_0^1 \min_{\forall i=1,2,\dots,k} \mu_{il}(x) dx}{\int_0^1 \max_{\forall i=1,2,\dots,k} \mu_{il}(x) dx},$$

$$\tilde{k} = \sqrt[m]{\prod_{l=1}^m \frac{\int_0^1 \min_{\forall i=1,2,\dots,k} \mu_{il}(x) dx}{\int_0^1 \max_{\forall i=1,2,\dots,k} \mu_{il}(x) dx}}, \quad (3)$$

где $l=1, 2, \dots, m$ – номер термина, $i=1, 2, \dots, k$ – номер эксперта; $\mu_{il}(x)$ – ФП, которую задал i -й эксперт для l -го термина.

Оценка согласованности экспертной информации является необходимым шагом на этапе фаззификации, поскольку определяет качество информации и отражает степень адекватности формального описания реальной ситуации, что позволяет использовать это описание в системе нечеткого логического вывода. Для формирования блока экспертной информации, удовлетворяющей всем требованиям, целесообразно использовать алгоритм, предложенный в [14].

В результате анализа предметной области «предварительная настройка» была создана база знаний, на которой основан логический вывод решения. База правил системы нечеткого вывода – это конечное множество правил нечетких продукций, согласованных относительно используемых в них ЛП. Данная база предназначена для формализации эмпирических знаний в исследуемой предметной области и обычно состоит из набора правил типа: ЕСЛИ «Условие_1» ТО «Заключение_1».

Основой механизма вывода решений ИИС служит модель предметной

⁴ Кофман Л. Введение в теорию нечетких множеств / пер. с франц. М.: Радио и связь, 1982. 432 с.



области в виде композиции нечетких отношений семантических пространств внешних факторов и регулируемых параметров машины [15]. В общем случае развернутая форма нечеткого логического вывода для системы знаний имеет вид⁵:

$$\mu_{B'} = \bigvee_{x \in X} (\mu_{A'}(x) \wedge \mu_R(x, y)).$$

На этапе дефаззификации вычисляются точные значения результирующих ЛП. Наиболее распространенным является метод «центра тяжести»:

$$y' = \left(\int_Y y \mu_{B'}(y) dy \right) / \left(\int_Y \mu_{B'}(y) dy \right).$$

Для вычислений использовалась среда MATLAB, в частности, пакет прикладных программ Fuzzy Logic Toolbox. Также можно применить приближенную методику, имеющую достаточно высокую точность [16].

Результаты исследования

Проиллюстрируем перечисленные этапы решения задачи оптимальной технологической настройки зерноубо-

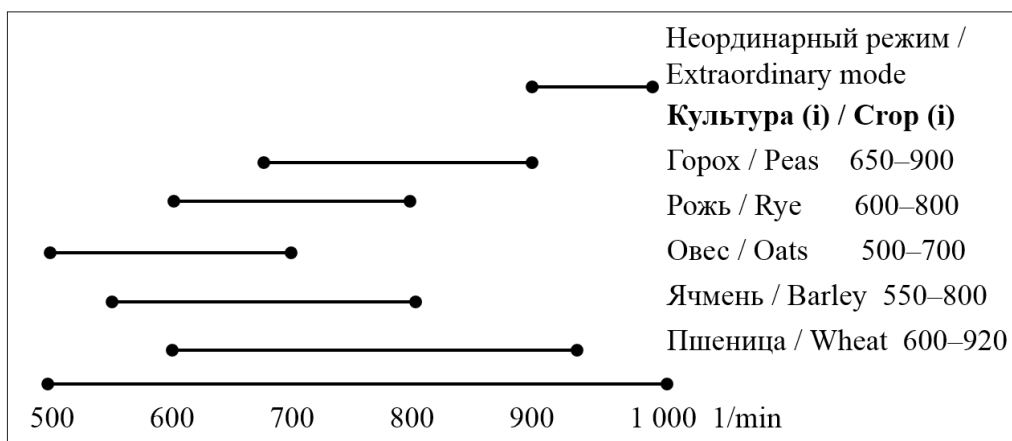
рочного комбайна на одном из регулируемых параметров – частоте вращения крыла вентилятора очистки.

На первом этапе определим лингвистическую шкалу. Опыт практической работы и анализ предметной области показали, что пределы изменения частоты вращения будут отличаться для различных культур. Наименования культур и значения пределов изменения носителя приведены на рис. 1.

Для описания термов в данной работе использовались типовые функции треугольного и трапециевидного вида, наиболее удобные для экспертного оценивания и дальнейшего применения на этапах вывода решения [17].

Лингвистическое описание входных факторов приведем для конкретной культуры – пшеницы. Известно, что в этом случае на рассматриваемый выходной параметр существенное влияние оказывают такие факторы внешней среды как урожайность, влажность хлебной массы, соломистость, засоренность [15].

Многообразие условий работы комбайна требует дифференциации таких показателей как урожайность, поэтому



Р и с. 1. Границы носителей для различных культур при оснащении комбайна копнителем

F i g. 1. Boundary of carriers for different crops when the combine is equipped with a digger

⁵ Асаи К., Вагада Д., Сугэно С. Прикладные нечеткие системы / пер. с япон. М. : Мир, 1993. 368 с.

данный параметр целесообразно рассматривать для различных значений, в частности, урожайность ~ 50 ц/га, 40 ц/га и т. д. В данном примере используем урожайность ~ 50 ц/га, получим следующее лингвистическое описание рассматриваемых внешних факторов. Кортежи ЛП «Урожайность-50», «Влажность хлебопоя», «Соломистость» и «Засоренность хлебопоя» имеют вид:

<УРОЖАЙНОСТЬ-50, ц/га {Менее 50, Приблизительно 50, Более 50} [44–56] >
УР = {УРМ50, УРП50, УРБ50} (рис. 2, а);

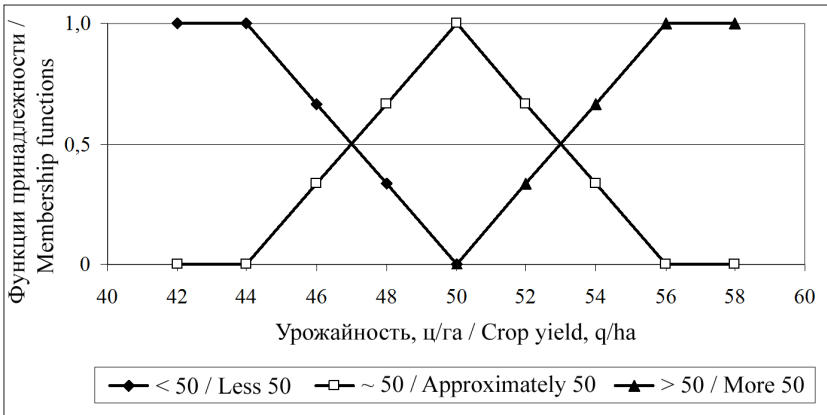
<ВЛАЖНОСТЬ ХЛЕБОПОЯ, % {Сухой, Нормальный, Влажный} [0–30] >
ВХ = {СХл, НОРХл, ВЛХл} (рис. 2, б);

<ЗАСОРОЕННОСТЬ ХЛЕБОПОЯ, % {Низкая, Большая} [0–40] >
ЗХ = {НЗХ, БЗХ} (рис. 2, с);

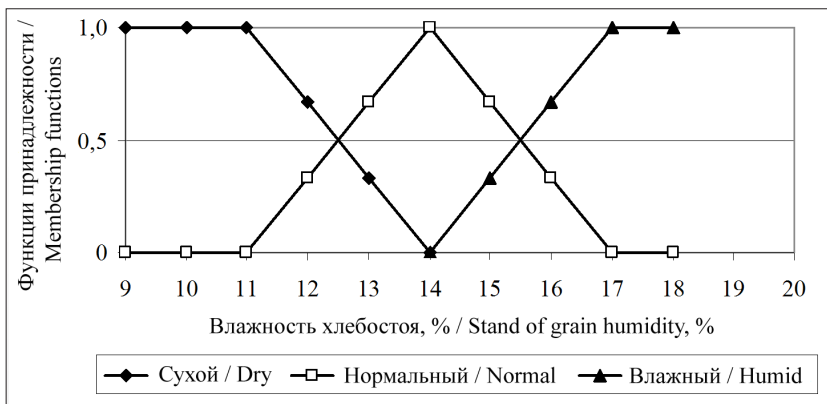
<СОЛОМИСТОСТЬ, % {Малая, Нормальная} [40–70] >
СОЛ = {МСОЛ, НСОЛ} (рис. 2, d).

Кортеж ЛП «Частота вращения крыла вентилятора очистки» для различных культур имеет вид:

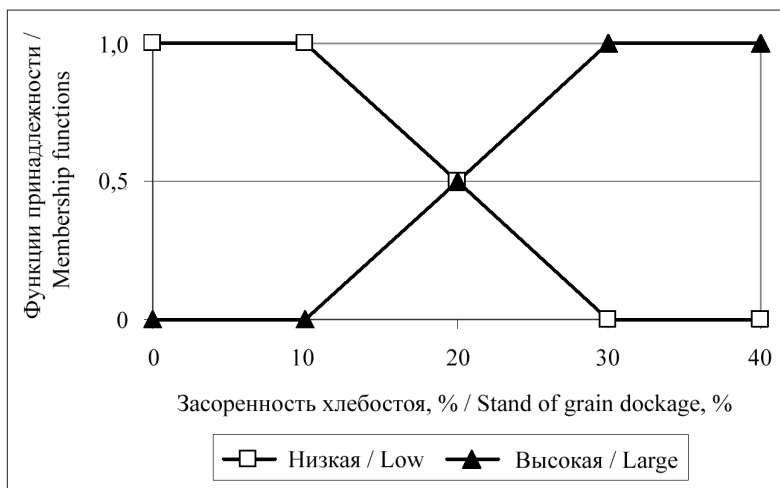
<ЧАСТОТА ВРАЩЕНИЯ КРЫЛАЧА ВЕНТИЛЯТОРА ОЧИСТКИ (культура (i)), об/мин {Очень низкая, Низкая, Ниже средней, Средняя, Выше средней, Высокая, Очень высокая [носитель (j)], >



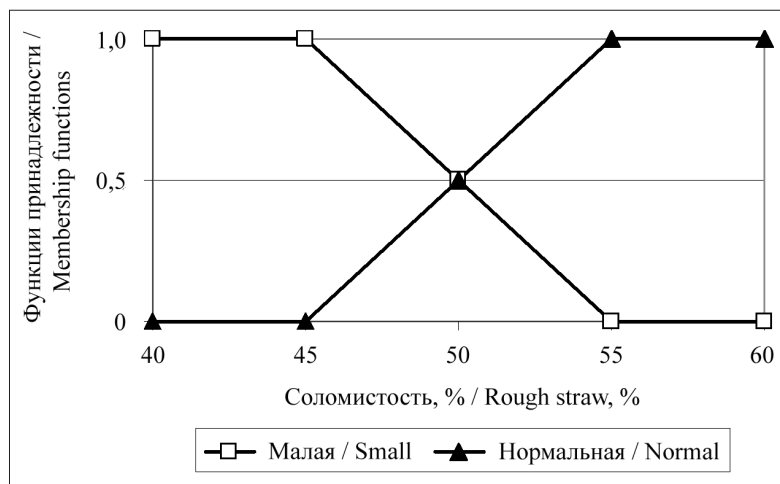
а)



б)



c)



d)

Р и с. 2. Функции принадлежности внешних факторов: а) «Урожайность-50»; б) «Влажность хлебоствя»; с) «Засоренность хлебоствя»; д) «Соломистость»

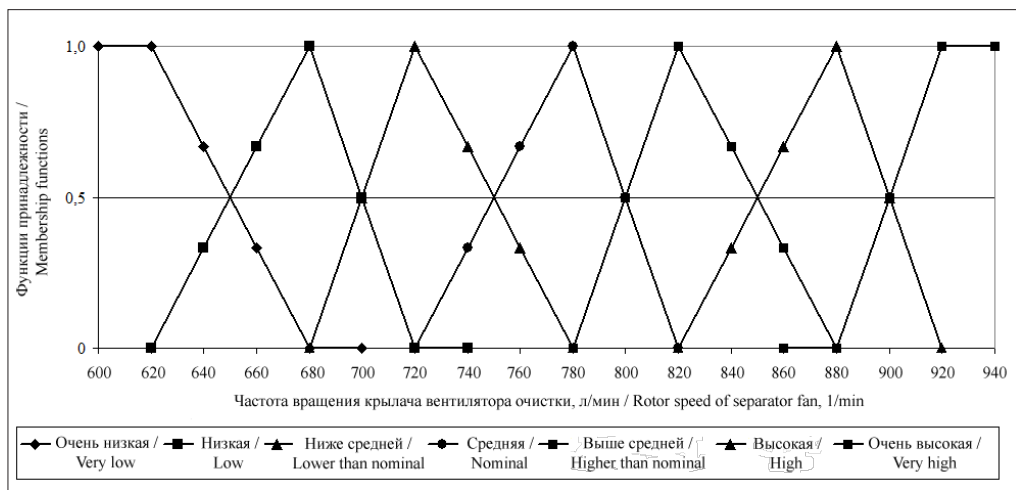
F i g. 2. Membership functions of external factors: а) «crop yield-50»; б) «grain humidity»; с) «grain dockage»; д) «rough straw»

ЧВКВО (к) = {ОН, Н, НС, С, ВС, В, ОВ, 1/мин}, $i, j \in 1, n$.

Функция принадлежности ЛП «ЧВКВО» для пшеницы-50 представлена на рис. 3.

Существенным является вопрос выбора количества термов ЛП. С одной

стороны, оно должно быть достаточным, чтобы выявить и описать взаимодействия рассматриваемого фактора с показателями качества работы, а с другой – удобным для оценок и соответствующим точности измерений данного параметра. Поэтому перед выбором оптимального количества термов был проведен



Р и с. 3. Функция принадлежности лингвистической переменной «Частота вращения крыльча вентилятора очистки» для пшеницы-50

Fig. 3. Membership function of linguistic variable “Rotor speed of separator fan” for wheat-50

априорный анализ предметной области и установлено, что указанные количества термов для всех ЛП удовлетворяют всем перечисленным требованиям. Кроме этого, был проведен апостериорный анализ по критерию согласованности экспертной информации; вычислены все характеристики согласованности по формулам (1–3). Приведем часть

результатов оценки согласованности, полученных для ЛП «ЧВКВО» для различных культур (табл. 1–2). Экспертная информация была получена от четырех экспертов.

Данные табл. 1–2 показывают достаточный уровень согласованности экспертной информации, а следовательно, используемое описание базово-

Таблица 1
Table 1

Матрицы парной согласованности всех термов для различных культур
The pair consistency matrices for all terms for various crops

Культура / Crop	Эксперт 1 / Expert 1	Эксперт 2 / Expert 2	Эксперт 3 / Expert 3	Эксперт 4 / Expert 4
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
Пшеница / Wheat	1,000	0,992	0,735	0,907
	0,992	1,000	0,795	0,832
	0,735	0,795	1,000	0,813
	0,907	0,832	0,813	1,000
Ячмень / Barley	1,000	0,927	0,853	0,888
	0,927	1,000	0,796	0,873
	0,853	0,796	1,000	0,884
	0,888	0,873	0,884	1,000



1	2	3	4	5
Рожь / Rye	1,000	0,873	1,000	0,911
	0,873	1,000	0,873	0,955
	1,000	0,873	1,000	0,911
	0,911	0,955	0,911	1,000
Овес / Oats	1,000	0,807	0,875	0,920
	0,807	1,000	0,829	0,743
	0,875	0,829	1,000	0,795
	0,920	0,743	0,795	1,000
Горох / Peas	1,000	0,889	1,000	0,889
	0,889	1,000	0,889	1,000
	1,000	0,889	1,000	0,889
	0,889	1,000	0,899	1,000

Таблица 2

Table 2

Показатели общей согласованности экспертных оценок функций принадлежности для различных культур

Indices of general consistency of expert assessments of membership functions for various crops

n	Культура (i) / Crop (i)	k	\tilde{k}
1	Пшеница / Wheat	0,734	0,727
2	Ячмень / Barley	0,783	0,774
3	Рожь / Rye	0,873	0,865
4	Овес / Oats	0,706	0,674
5	Горох / Peas	0,762	0,758

го терм-множества применимо на следующих этапах.

Приведем фрагмент базы знаний, созданной в результате анализа предметной области и послужившей основой логического вывода решения:

1 ЕСЛИ <Урожайность есть «меньше_50» и Засоренность есть «низкая» и Соломистость есть «малая» и Влажность хлебостоя есть «сухой»> ТО <Частота вращения есть «очень_низкая»>

2 ЕСЛИ <Урожайность есть «меньше_50» и Засоренность есть «низкая» и Соломистость есть «малая» и Влаж-

ность хлебостоя есть «нормальный»> ТО <Частота вращения есть «ниже_средней»>

...

36 ЕСЛИ <Урожайность есть «более_50» и Засоренность есть «высокая» и Соломистость есть «нормальная» и Влажность хлебостоя есть «влажный»> ТО <Частота вращения есть «очень_высокая»>.

Параметрами обобщенных ФП, как правило, служат усредненные значения представленных экспертами параметров. Способы усреднения могут быть

различными [18], в данной работе использованы средние арифметические значения.

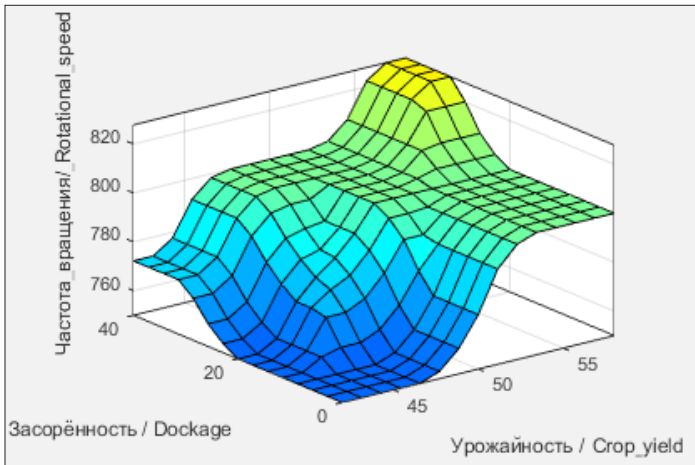
Нечеткий вывод является применением максиминной композиции в качестве композиционного правила нечеткого вывода и операции взятия минимума в качестве нечеткой импликации [15]:

$$\begin{aligned} \mu_{ПЧВКВО} &= \bigvee_{x \in X} (\mu_{ПВ}(x) \wedge \mu_R(x, y)) = \\ &= \bigvee_{x \in X} (\mu_{ПВ}(x) \wedge (\mu_{ОВ}(x) \wedge \mu_{ВЧВКВО}(y))) = \end{aligned}$$

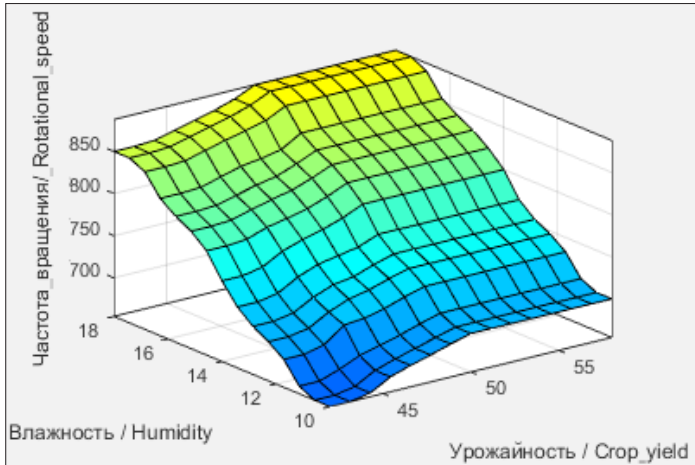
$$\begin{aligned} &= (\bigvee_{x \in X} \mu_{ПВ}(x) \wedge \mu_{ОВ}(x)) \wedge \mu_{ВЧВКВО}(y) = \\ &= \bigvee_{x \in X} \mu_{ОВПВ}(x) \wedge \mu_{ВЧВКВО}(y) = \\ &= \alpha \wedge \mu_X(y) = \mu_{\alpha Y ВЧВКВО}(y). \end{aligned}$$

На рис. 4 приведены примеры поверхностей отклика взаимосвязей для пшеницы-50, отвечающие сформированной нечеткой системе продукционных правил.

В табл. 3 приведены полученные в MATLAB результаты расчетов выходов



a)



b)

Р и с. 4. Поверхности отклика взаимосвязей частоты вращения крылача вентилятора очистки от а) урожайности и засоренности; б) урожайности и влажности

Fig. 4. Response surfaces of rotational speed of the rotor of separator fan vs а) crop yield and dockage; б) crop yield and humidity



ного параметра в зависимости от различных значений входных факторов.

Таблица 3
Table 3

Расчетные значения выходного параметра при различных значениях входных факторов
The calculated values of the output parameter for different values of the input factors

Параметры / Parameters	Значения / Values		
Урожайность, ц/га / Crop yield, q/ha	44	50	54
Влажность, % / Stand of grain humidity, %	14	16	16
Засоренность, % / Stand of grain dockage, %	10	10	10
Соломистость, % / Rough straw, %	50	50	60
Частота вращения крылача вентилятора очистки, 1/мин / Rotor speed of separator fan, 1/min	750	829	833

Обсуждение и заключения

Задача принятия решений при предварительной настройке рабочих органов уборочных машин, функционирующих в полевых условиях, относится к классу неформализованных. Предложенный лингвистический подход для решения указанной задачи удовлетворяет основным требованиям системного анализа. Его реализация позволила построить адекватные внешним условиям модели, в которых всесторонне учтены основные элементы системы и взаимосвязи между ними. Существенным преимуществом лингвистического подхода является возможность адекватного представления на единой формализованной основе количественных, качественных (лингвистических) и эвристических признаков рассматриваемой системы. Созданная модель предметной области в полной мере соответствует реальным условиям функционирования комбайнов. Полученную информацию рекомендуется использовать для создания базы знаний ИИС для технологической настройки комбайна.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Ерохин С. Н., Решетов А. С.** Влияние технологических регулировок на потери зерна за молотилкой комбайна Дон-1500 // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2003. № 6. С. 18–19. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21720341>
2. Оптимизация технологического процесса по статистическим данным / Е. Ф. Ветров [и др.] // Машиноведение. 1986. № 5. С. 48–55.
3. **Литвин Л. М., Жалкин Э. В., Ветров Е. Ф.** Обобщенная оценка зональных показателей работы зерноуборочных комбайнов // Техника в сельском хозяйстве. 1989. № 5. С. 41–45. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24826522>
4. **Царев Ю. А., Харьковский А. В.** Перспективы использования электронной системы управления в комбайнах «Дон» и «Нива» // Тракторы и сельхозмашины. 2005. № 1. С. 37–38. URL: <http://www.avtomash.ru/gur/2005/200501.htm>
5. **Borisova L. V., Dimitrov V. P., Nurutdinova I. N.** Intelligent system for technological adjustment of the harvesting machines parameters // Proc. of the Second International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry”. 2018. P. 96–105. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-68324-9_11
6. Design, development and performance evaluation of an automatic control system for rice whitening machine based on computer vision and fuzzy logic / H. Zareiforush [et al.] // Computers and Electronics in Agriculture. 2016. Vol. 124. P. 14–22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.01.024>
7. Weed detecting robot in sugarcane fields using fuzzy real time classifier / M. Sujaritha [et al.] // Computers and Electronics in Agriculture. 2017. Vol. 134. P. 160–171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.01.008>

8. Design of fuzzy logic control system incorporating human expert knowledge for combine harvester / M. Omid [et al.] // Expert Systems with Applications. 2010. Vol. 37, Issue 10. P. 7080–7085. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.03.010>

9. Fuzzy control of the cleaning process on a combine harvester / G. Craessaerts [et al.] // Biosystems Engineering. 2010. Vol. 106, Issue 2. P. 103–111. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystem-seng.2009.12.012>

10. Zadeh L. A. Fuzzy sets / Information and Control. 1965. Vol. 8, Issue 3. P. 338–353. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)

11. Zadeh L. A. Knowledge representation in fuzzy logic // An Introduction to Fuzzy Logic Applications in Intelligent Systems. The Springer International Series in Engineering and Computer Science. Boston : Springer, 1992. Vol. 165. P. 1–27. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3640-6_1

12. Борисова Л. В., Димитров В. П. Лингвистический подход к решению задачи технологической регулировки комбайнов // Вестник Мордовского университета. 2017. Т. 27, № 2. С. 181–193. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.027.201702.178-189>

13. Dimitrov V. P., Borisova L. V., Nurutdinova I. N. Modelling of fuzzy expert information in the problem of a machine technological adjustment // MATEC Web of Conference. 2017. Vol. 132. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713204009>

14. Borisova L. V., Dimitrov V. P., Nurutdinova I. N. Algorithm for assessing quality of fuzzy expert information // Proc. of IEEE East-West Design & Test Symposium. 2017. P. 319–322. DOI: <https://doi.org/10.1109/EWDTS.2017.8110107>

15. Borisova L. V., Nurutdinova I. N., Dimitrov V. P. Approach to the problem of choice of values of the adjustable parameters harvester based on fuzzy modeling // Вестник Донского государственного технического университета. 2015. Т. 81, № 2. С. 100–107. DOI: <https://doi.org/10.12737/11611>

16. О методике дефаззификации нечеткой экспертной информации / В. П. Димитров [и др.] // Вестник Донского государственного технического университета. 2010. Т. 10, № 6 (49). С. 868–878. URL: http://science.donstu.ru/apex/f?p=381:39:6717046100545:::NO:P39_FILE_ID:8882024471960992

17. Борисова Л. В., Нурутдинова И. Н., Димитров В. П. О методике представления нечетких экспертных знаний // Вестник Донского государственного технического университета. 2014. Т. 14, № 4 (79). С. 93–102. DOI: <https://doi.org/10.12737/6887>

18. Нурутдинова И. Н., Шумская Н. Н., Димитрова Л. А. Об использовании весовых коэффициентов при формировании экспертной информации // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : сб. статей 10-й Междунар. юбилейной науч.-практ. конф. в рамках 20-й Междунар. агропромышленной выставки «Интераргомаш-2017». Ростов-на-Дону : Донской государственный технический университет, 2017. С. 332–334. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28781436>

Поступила 22.02.2018; принята к публикации 17.04.2018; опубликована онлайн 29.06.2018

Об авторах:

Димитров Валерий Петрович, декан факультета приборостроения и технического регулирования, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), доктор технических наук, профессор, ResearcherID: E-4908-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1439-1674>, kaf-qm@donstu.ru

Борисова Людмила Викторовна, заведующая кафедрой менеджмента и бизнес-процессов, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), доктор технических наук, профессор, ResearcherID: E-4863-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6611-4594>, borisovalv09@mail.ru

Тугенгольд Андрей Кириллович, профессор кафедры робототехники, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), доктор технических наук, ResearcherID: E-5707-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0551-1486>, akt@yandex.ru



Нурутдинова Инна Николаевна, доцент кафедры прикладной математики, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), кандидат физико-математических наук, ResearcherID: E-3961-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3375-1295>, nurut.inna@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

В. П. Димитров – анализ предметной области, моделирование нечетких экспертных знаний; Л. В. Борисова – разработка методики построения нечеткого логического вывода применительно к задаче технологической настройки; А. К. Тугенгольд – разработка базы знаний; И. Н. Нурутдинова – анализ согласованности экспертных знаний, получение результатов в среде MATLAB.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Yerokhin S. N., Reshetov A. S. [The influence of technological adjustments on grain losses for the Don-1500 harvester thresher]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva* = Mechanization and Electrification of Agriculture. 2003; 6:18–19. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=21720341> (In Russ.)
2. Vetrov Ye. F., Genkin M. D., Litvin L. M., Nelyubov N. I., Eglays V. O. [Optimization of the technological process according to statistical data]. *Mashinovedeniye* = Machine Science. 1986; 5:48–55 (In Russ.)
3. Litvin L. M., Zhalkin E. V., Vetrov Ye. F. [Generalized assessment of zonal indicators of the work of combine harvesters]. *Tekhnika v selskom khozyaystve* = Machinery in Agriculture. 1989; 5:41–45. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24826522>
4. Tsarev Yu. A., Kharkovskiy A. V. [Prospects of using the electronic control system in the Don and Niva combines]. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2005; 1:37–38. Available at: <http://www.avtomash.ru/gur/2005/200501.htm> (In Russ.)
5. Borisova L. V., Dimitrov V. P., Nurutdinova I. N. Intelligent system for technological adjustment of the harvesting machines parameters. In: Proceedings of the Second International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry”. 2018, pp. 96–105. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-68324-9_11
6. Zareiforouh H., Minaei S., Alizadeh M. R., Banakar A., Samani B. H. Design, development and performance evaluation of an automatic control system for rice whitening machine based on computer vision and fuzzy logic. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2016; 124:14–22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.01.024>
7. Sujaritha M., Annadurai S., Satheeshkumar J., Kowshik S., Mahesha L. Weed detecting robot in sugarcane fields using fuzzy real time classifier. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2017; 134:160–171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.01.008>
8. Omid M., Lashgari M., Mobli H., Alimardani R., Mohtasebi S., Hesamifard R. Design of fuzzy logic control system incorporating human expert knowledge for combine harvester. *Expert Systems with Applications*. 2010; 37(10):7080–7085. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.03.010>
9. Craessaerts G., Baerdemaeker J. de, Missotten B., Saeys W. Fuzzy control of the cleaning process on a combine harvester. *Biosystems Engineering*. 2010; 106(2):103–111. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.12.012>
10. Zadeh L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*. 1965; 8(3):338–353. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
11. Zadeh L. A. Knowledge representation in fuzzy logic. An Introduction to Fuzzy Logic Applications in Intelligent Systems. In: The Springer International Series in Engineering and Computer Science. Boston: Springer, 1992; 165:1–27. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3640-6_1

12. Borisova L. V., Dimitrov V. P. A linguistic approach to solving of the problem of technological adjustment of combines. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2017; 27(2):178–189. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.027.201702.178-189> (In Russ.)
13. Dimitrov V. P., Borisova L. V., Nurutdinova I. N. Modelling of fuzzy expert information in the problem of a machine technological adjustment. MATEC Web of Conference. 2017; 132:1–4. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713204009>
14. Borisova L. V., Dimitrov V. P., Nurutdinova I. N. Algorithm for assessing quality of fuzzy expert information. In: Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium. 2017, pp. 319–322. DOI: <https://doi.org/10.1109/EWDTS.2017.8110107>
15. Borisova L. V. Nurutdinova I. N., Dimitrov V. P. Approach to the problem of choice of values of the adjustable parameters harvester based on fuzzy modeling. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Don State Technical University Bulletin. 2015; 81(2):100–107. DOI: <https://doi.org/10.12737/11611> (In Russ.)
16. Dimitrov V. P., Borisova L. V., Nurutdinova I. N., Bogatyreva E. V. On defuzzification method in fuzzy expert information processing. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Don State Technical University Bulletin. 2010; 10(6):868–878. Available at: http://science.donstu.ru/apex/f?p=381:39:6717046100545:::NO:P39_FILE_ID:8882024471960992 (In Russ.)
17. Borisova L. V., Nurutdinova I. N., Dimitrov V. P. On technique of fuzzy expert knowledge representation. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Don State Technical University Bulletin. 2014; 14(4): 93–102. DOI: <https://doi.org/10.12737/6887> (In Russ.)
18. Nurutdinova I. N., Shumskaya N. N., Dimitrova L. A. [On the use of weight coefficients in the formation of expert information]. In: Modern situation and prospects of the development of agricultural engineering: A collection of articles of the 10th International Jubilee Scientific and Practical Conference in the framework of the 20th International Agricultural Exhibition “Interargomash-2017”. Rostov-on-Don: Don State Technical University Publ.; 2017. pp. 332–334. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28781436> (In Russ.)

Received 22.02.2018; revised 17.04.2018; published online 29.06.2018

About authors:

Valery P. Dimitrov, Dean of the Faculty of Instrument Engineering and Technical Regulation, Don State Technical University (1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don 344000, Russia), D.Sc. (Engineering), Professor, ResearcherID: E-4908-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1439-1674>, kaf-qm@donstu.ru

Lyudmila V. Borisova, Head of the Chair of Management and Business Processes, Don State Technical University (1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don 344000, Russia), D.Sc. (Engineering), Professor, ResearcherID: E-4863-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6611-4594>, borisovalv09@mail.ru

Andrey K. Tugengold, Professor, Robotics Chair, Don State Technical University (1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don 344000, Russia), D.Sc. (Engineering), ResearcherID: E-5707-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0551-1486>, akt@yandex.ru

Inna N. Nurutdinova, Associate Professor, Applied Mathematics Chair, Don State Technical University (1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don 344000, Russia), Ph.D. (Physics and Mathematics), ResearcherID: E-3961-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3375-1295>, nurut.inna@yandex.ru

Authors' contribution:

V. P. Dimitrov – analysis of subject domain, modeling the fuzzy expert knowledge; L. V. Borisova – development of a technique of creation of fuzzy inference in relation to a problem of technological adjustment; A. K. Tugengold – development of the knowledge base; I. N. Nurutdinova – analysis of consistency of expert knowledge, processing in MATLAB environment.

All authors have read and approved the final version of the paper.