



Метод определения начальных значений регулируемых параметров жатвенной части зерноуборочного комбайна

В. П. Димитров , Л. В. Борисова, И. Н. Нурутдинова

Донской государственной технической университет

(г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

 kaf-qm@donstu.ru

Аннотация

Введение. Представлено решение задачи идентификации предметной области «предварительная настройка рабочих органов жатвенной части комбайна». Правильный выбор значений параметров жатвенной части как важнейшего элемента комбайна – одно из главных условий обеспечения высокого качества уборки, что и определило объект настоящего исследования. Цель исследования – разработка метода выбора значений регулируемых параметров жатвенной части зерноуборочного комбайна, соответствующих убираемой культуре и условиям уборки.

Материалы и методы. Решения о значениях технологических параметров комбайна, являющегося сложной иерархической системой, принимаются на основе информации о внешней среде и техническом состоянии машины. Поступающие данные имеют количественный, качественный и оценочный характер. Учитывая разнородность и нечеткость информации, для принятия решения применяются интеллектуальные информационные системы, основанные на математическом аппарате нечеткой логики и использующие лингвистический подход для описания предметной области. Данный подход применяется из-за сложности и неоднозначности взаимосвязей между регулируемыми параметрами и внешними факторами.

Результаты исследования. Исследована предметная область «предварительная настройка параметров жатвенной части комбайна». Подробно описана формально-логическая схема выбора значений регулируемых параметров жатвенной части. Установлены основные факторы, влияющие на значения регулируемых параметров жатвенной части, дано их лингвистическое описание, введены соответствующие входные и выходные лингвистические переменные, на основе экспертной информации построены функции принадлежности. Проведен анализ согласованности представленной информации и выбраны оптимальные модели. Создана база нечетких знаний, на которой основан дедуктивный вывод решений.

Обсуждение и заключение. Предложенный подход и созданная база нечетких знаний могут быть положены в основу интеллектуальной системы принятия решений по настройке регулируемых параметров комбайна. Применение такой системы в полевых условиях вместе с датчиками непрерывного мониторинга условий уборки урожая и автоматизированной системой анализа изображений позволит оперативно реагировать на изменение условий, существенно повысит результативность работы и сократит время принятия решений.

Ключевые слова: зерноуборочный комбайн, технологическая регулировка, принятие решений, лингвистическая переменная, функция принадлежности, нечеткий логический вывод

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Димитров В. П., Борисова Л. В., Нурутдинова И. Н., 2022



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Димитров В. П., Борисова Л. В., Нурутдинова И. Н. Метод определения начальных значений регулируемых параметров жатвенной части зерноуборочного комбайна // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 4. С. 552–566. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202204.552-566>

Original article

Method for Determining the Initial Values of the Adjustable Parameters of the Combine Harvester Cutting Unit

V. P. Dimitrov , L. V. Borisova, I. N. Nurutdinova

Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

 kaf-qm@donstu.ru

Abstract

Introduction. The article presents the solution of the problem of identifying the subject area “Preliminary adjustment of the working elements of the combine harvester cutting unit”. The correct choice of parameter values of the cutting unit as the most important element of a combine harvester is one of the main conditions for providing high quality harvesting. It is the fact that defined the object of the present study. The aim of the study is to develop a method for adjusting the values of parameters of a combine harvester cutting unit for the harvested crop and harvesting conditions.

Materials and Methods. Decisions on the values of technological parameters of the harvester, which is a complex hierarchical system, are made on the basis of information about the external environment and the machine technical state. The incoming data are quantitative, qualitative and evaluative in nature. Taking into account the heterogeneity and vagueness of the information, the decisions are made through using intelligent information systems, which are based on the fuzzy logic programming and use a linguistic approach to describe the subject area. This approach is used because of the complexity and ambiguity of the relationships between regulated parameters and external factors.

Results. The subject area “Preliminary adjustment of the combine harvester cutting unit parameters” has been investigated. The formal-logical scheme for selecting the values of adjustable parameters of the combine harvester cutting unit is described in detail. The main factors influencing the values of the combine harvester cutting unit adjustable parameters are defined, their linguistic description is given, the corresponding input and output linguistic variables are introduced, and the membership functions are built on the basis of expert information. The agreement analysis of the presented information has been carried out and optimal models have been selected. A fuzzy knowledge base is created, on which the deductive inference of decisions is based.

Discussion and Conclusion. The proposed approach and created fuzzy knowledge base can be used as the basis for an intelligent decision-making system for adjusting combine parameters. Using this system in the field in combination with sensors for continuous monitoring of harvesting conditions and an automated image analysis system will allow responding quickly to changing conditions, will significantly improve operational efficiency and reduce decision-making time.

Keywords: grain harvester, technological adjustment, decision-making, linguistic variable, membership function, fuzzy inference

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Dimitrov V.P., Borisova L.V., Nurutdinova I.N. Method for Determining the Initial Values of the Adjustable Parameters of the Combine Harvester Cutting Unit. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(4):552–566. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202204.552-566>

Введение

Качество процесса уборки зерновых и других сельскохозяйственных культур в значительной мере определяется тем, насколько установленные регулируемые параметры комбайна соответствуют условиям уборки. Зерноуборочный комбайн – одна из самых сложных сельскохозяйственных машин, обеспечивающих механизацию уборочных работ в растениеводстве. Задача технологической регулировки машины далеко не простая, так как отношения между внешними факторами, регулируемые параметрами и характеристиками качества уборки характеризуются многосвязностью, неоднозначностью, исходная информация носит нечеткий характер и не определена система предпочтений лица, принимающего решения. В результате этого на практике зачастую наблюдаются потери зерна, засорение и дробление, что обусловлено неадекватностью технологической настройки конкретным условиям [1].

Поскольку внешние условия, в которых работает комбайн, существенно влияют на установочные параметры, то к информации о внешних факторах предъявляются высокие требования в части достоверности и адекватности. Информация поступает в виде оценок экспертов, а также в результате обработки данных датчиков и анализа изображений, что говорит о ее нечетком характере. Взаимосвязи регулируемых параметров комбайна с внешними условиями еще более очевидно можно отнести к нечетким в силу неконкретного описания внешних условий, а также неоднозначности и наличия сложных корреляционных зависимостей. Для описания функционирования подобных систем традиционные методы математического моделирования, такие

как построение регрессионных моделей и другие статистические методы, опирающиеся на экспериментальные данные и цифровую обработку [2–6], практически непригодны, поскольку применимы только в рассматриваемом диапазоне величин, а оперативное переключение модели, необходимое в полевых условиях, невозможно без анализа новых экспериментальных данных. Помимо этого, наличие множества неоднозначных связей между внешними условиями, регулируемые параметрами и показателями качества уборки приводит к трудно оптимизируемым, громоздким математическим конструкциям в рамках множественного регрессионного анализа и делает само применение этого подхода неэффективным.

Перспективным направлением решения данной задачи является проектирование интеллектуальных систем, использующих экспертные знания и обеспечивающих эффективность управления различными техническими системами¹. Создание интеллектуальной системы для технологической регулировки предполагает идентификацию предметной области, логико-лингвистическое описание и привлечение математического аппарата нечеткой логики.

Целью настоящей работы является разработка метода выбора начальных значений регулируемых параметров жатвенной части зерноуборочного комбайна.

Обзор литературы

Для описания процессов принятия решений по управлению технологическими процессами в сложных системах используется математический аппарат нечеткой логики. В последние годы он достаточно широко применяется для решения задач агропромышленного комплекса, среди которых идентификация сорняков, оценка урожайности,

¹ Аверкин А. Н. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта. М. : Книга по требованию, 2021. 312 с.

оценка качества почвы, повышение продуктивности культур и эффективности использования удобрений и др. [7–10]. Обосновано применение данного подхода к оценке значений регулируемых параметров комбайна [11–13] и к проблеме оперативной корректировки технологических настроек в случае обнаружения нарушений качества уборки [14].

Задача предварительной настройки относится к классу задач принятия решений в нечетких условиях, поскольку характеристики внешних факторов имеют нечеткие размытые границы, неоднозначно влияние различных комбинаций параметров настройки на показатели качества уборки, а устанавливаемые априорно взаимосвязи могут оказаться неадекватными для реальной ситуации. Все эти факты послужили основанием для выбора способа решения данной задачи – создания интеллектуальной системы, использующей для получения решения нечеткий логический вывод, основанный на информации экспертного, оценочного и эвристического характера [11]. Источниками такой информации являются квалифицированные специалисты в данной области, накопленные знания о взаимосвязях показателей качества уборки, внешние условия и параметры настройки комбайна. Такой подход был использован для вывода важнейших регулируемых параметров комбайна: скорости движения, частоты вращения молотильного барабана, частоты вращения вентилятора очистки [11; 15].

Наряду с перечисленными параметрами для качественной уборки урожая существенное значение имеет правильный выбор параметров жатвенной части комбайна, таких как вынос мотвила по вертикали и горизонтали и другие. Предварительная настройка регулируемых параметров комбайна, соответствующих условиям уборки, охватывает весь комплекс параметров,

и настоящее исследование посвящено разработке метода выбора оптимальных значений параметров жатвенной части. В проведенных ранее исследованиях представлено лингвистическое описание внешних факторов, рассмотрены урожайность, влажность, засоренность и соломистость зерна [11; 14; 15]. На основе алгоритма были установлены оптимальные модели лингвистических переменных, соответствующих перечисленным факторам [16]. Для настройки параметров жатвенной части являются актуальными и другие параметры, такие как высота, полеглость хлебостоя и другие. Их лингвистическое описание представлено в другой работе [17].

В данном исследовании в рамках разработанного метода выбора параметров жатвенной части описано систематизированное формально-логическое построение условий задачи, включающее лингвистическое описание внешних факторов и регулируемых параметров жатвенной части и создана система правил нечетких продукций для вывода решения.

Материалы и методы

Предлагаемый подход к формированию метода предварительной настройки регулируемых параметров жатвенной части базируется на математическом аппарате нечеткой логики и в общем виде состоит из этапов фаззификации, композиции и дефаззификации [11; 15]. Далее остановимся подробно на каждом из них.

На этапе фаззификации формулируется лингвистическое описание условий задачи [18], определяется множество $\{X\}$ входных переменных задачи в виде совокупности значений факторов внешней среды, существенно влияющих на величину выходной переменной Y – регулируемого параметра машины. В нашем случае при наличии нескольких регулируемых параметров выводы их значений рассматриваются как параллельные процессы.

Модели входных и выходных признаков X, Y представляются в виде семантических пространств и соответствующих им функций принадлежности (ФП) [18].

Следующие этапы решения включают квалиметрическую оценку шкал носителя, выбор базовых и расширенных терм-множеств лингвистической переменной (ЛП), построение ФП одним из методов, проверку выполнения требований к ФП, оценку степени согласованности нечетких экспертных знаний, построение обобщенной ФП.

При построении ФП используются нормальные нечеткие множества с верхней границей, равной 1 ($\sup_{x \in E} \mu_A(x) = 1$), причем как унимодальные (например, треугольной или экспоненциальной формы), так и имеющие область толерантности (например, трапецевидные). Среди процедур построения ФП выберем представление с помощью стандартных функций треугольной и трапецевидной форм, оценка параметров которых не вызывает затруднений у экспертов и отвечает специфике неопределенности.

Согласованность экспертной информации оценивается следующими характеристиками [16; 18]:

- матрицей K парной согласованности моделей экспертов;
- матрицей D нечеткости;
- аддитивным k и мультипликативным \tilde{k} показателями.

Первые две характеристики определяют парную согласованность моделей, а последние – согласованность моделей в целом.

Экспертные модели ЛП используются в процессе нечеткого логического вывода решения, что обуславливает высокие требования к адекватности

экспертной информации реальным условиям. Согласованность экспертной информации является одним из критериев ее качества. Низкая согласованность может возникать из-за недостаточной квалификации кого-то из экспертов. Для установления этого факта анализируют матрицы нечеткости D и парной согласованности K моделей и выполняют корректировку согласно алгоритму [16]. Общая несогласованность требует более углубленного анализа модели, положенной в основу формального описания.

Формальное представление зависимостей между выходным и входными параметрами имеет вид эмпирических правил, образующих базу нечетких знаний, в частном случае, множество правил нечетких продукций вида

$$i: A \Rightarrow B; (F),$$

где i – имя нечеткой продукции; $A \Rightarrow B$ – ядро продукции, в котором A – антецедент, включающий элементарные предложения, соединенные логическими связками «и», а B – консеквент, выражающий заключение; \Rightarrow – оператор логического следования; F – коэффициент достоверности продукции². В словесной форме ядро продукции имеет вид «ЕСЛИ A , ТО B ». Для проверки адекватности сформулированных правил строят поверхности, отражающие зависимости выходной ЛП от различных комбинаций входных ЛП, взятых попарно.

В общем случае развернутая форма нечеткого логического вывода для системы продукций имеет вид³

$$\mu_{B'} = \bigvee_{x \in X} (\mu_{A'}(x) \wedge \mu_R(x, y)). \quad (1)$$

² Там же.

³ Асаи К., Вагада Д., Сугэно С. Прикладные нечеткие системы / пер. с япон. М. : Мир, 1993. 368 с.

На этапе дефаззификации для конкретной комбинации внешних факторов выводятся методом центра тяжести значения выходных параметров⁴. Вывод реализуется в пакете Fuzzy Logic Toolbox (MatLab).

Результаты исследования

На основе систематизации описанных выше этапов и их приложения к исследованию предметной области «предварительная настройка жатвенной части комбайна» предложен метод решения задачи выбора оптимальных начальных значений параметров рабочих органов агрегата. Иерархия составляющих метода включает несколько уровней и приведена на рисунке 1. Далее рассмотрим подробно отдельные элементы данной структурной схемы.

В результате использования метода концептуализации выполняется определение входных и выходных факторов, их отношений и типов данных. Рассматриваются внешние факторы, оказывающие влияние на регулируемые параметры жатвенной части. Среди них наиболее существенными являются урожайность, засоренность, влажность, высота, полеглость, густота, спутанность хлебостоя. При определении лингвистической шкалы ЛП, соответствующих перечисленным факторам, необходимо учитывать тип убираемой культуры. Может потребоваться и дифференциация такого фактора, как урожайность. Так, для пшеницы рассматривают урожайность примерно 60, 50, 40 ц/га и т. д.

Выходными ЛП в поставленной задаче являются скорость машины, положение мотовила по высоте относительно режущего аппарата, положение мотовила по горизонтали (вынос мотовила), высота среза, а также различные

зазоры, такие как зазор между витками шнека и днищем жатки, зазор между пальцами шнека и днищем жатки.

Выбор значений перечисленных входных факторов и выходных параметров является частью общей задачи настройки регулируемых параметров комбайна, схема решения которой представлена на рисунке 2.

Построение модели предметной области включает структурную и параметрическую идентификацию. Структурная идентификация подразумевает установление взаимосвязей регулируемого параметра и внешних факторов на основе эмпирических правил. На этапе параметрической идентификации определяются носители и число термов ЛП, параметры ФП и коэффициенты достоверности правил продукций, при которых расхождение модельных и экспериментальных результатов должно быть минимальным.

Приведем лингвистическое описание нескольких внешних факторов и регулируемых параметров для одной из культур – пшеницы (табл. 1).

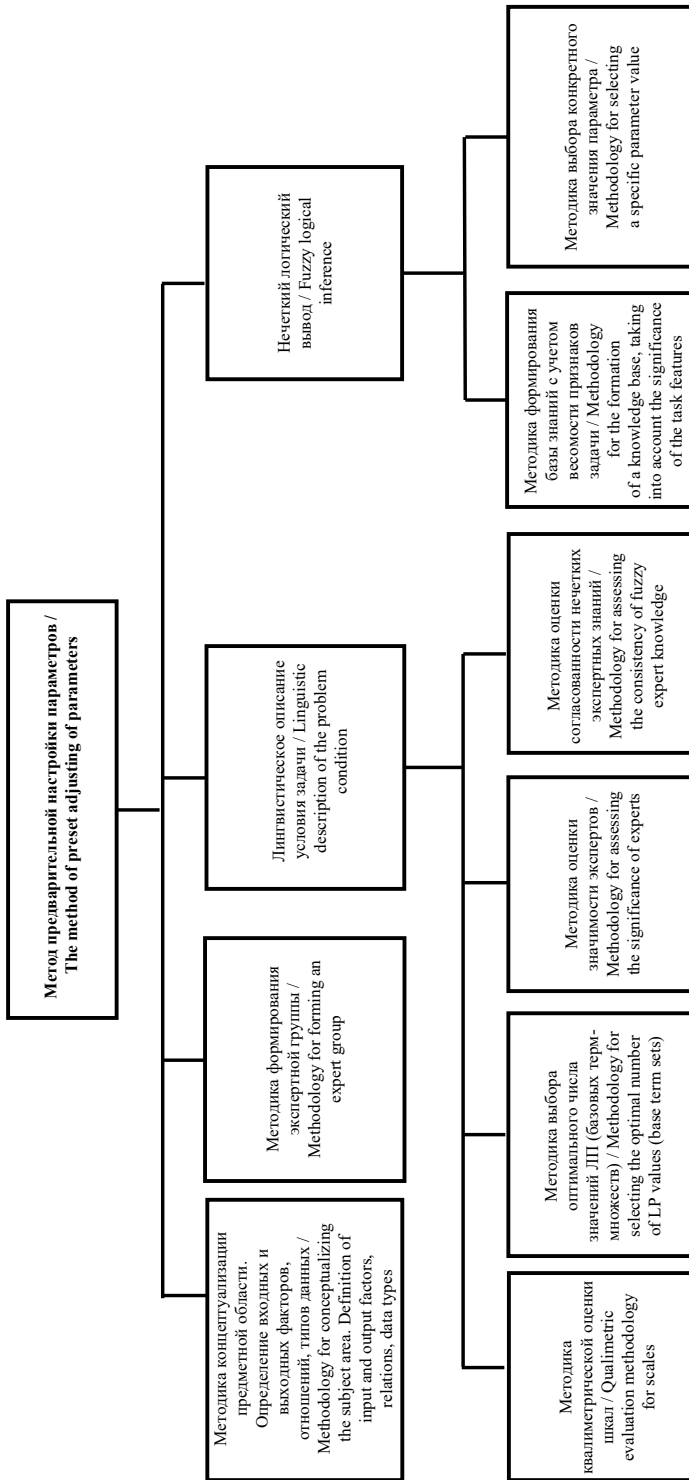
Выбор границ термов проиллюстрирован на рисунке 3 для ЛП «положение мотовила по высоте».

Указано количество термов ЛП, выбранных на основе критериев согласованности при обработке информации четырех экспертов [16]. Характеристики согласованности вычислены с помощью программного комплекса [19] и представлены в таблице 2 для нескольких ЛП.

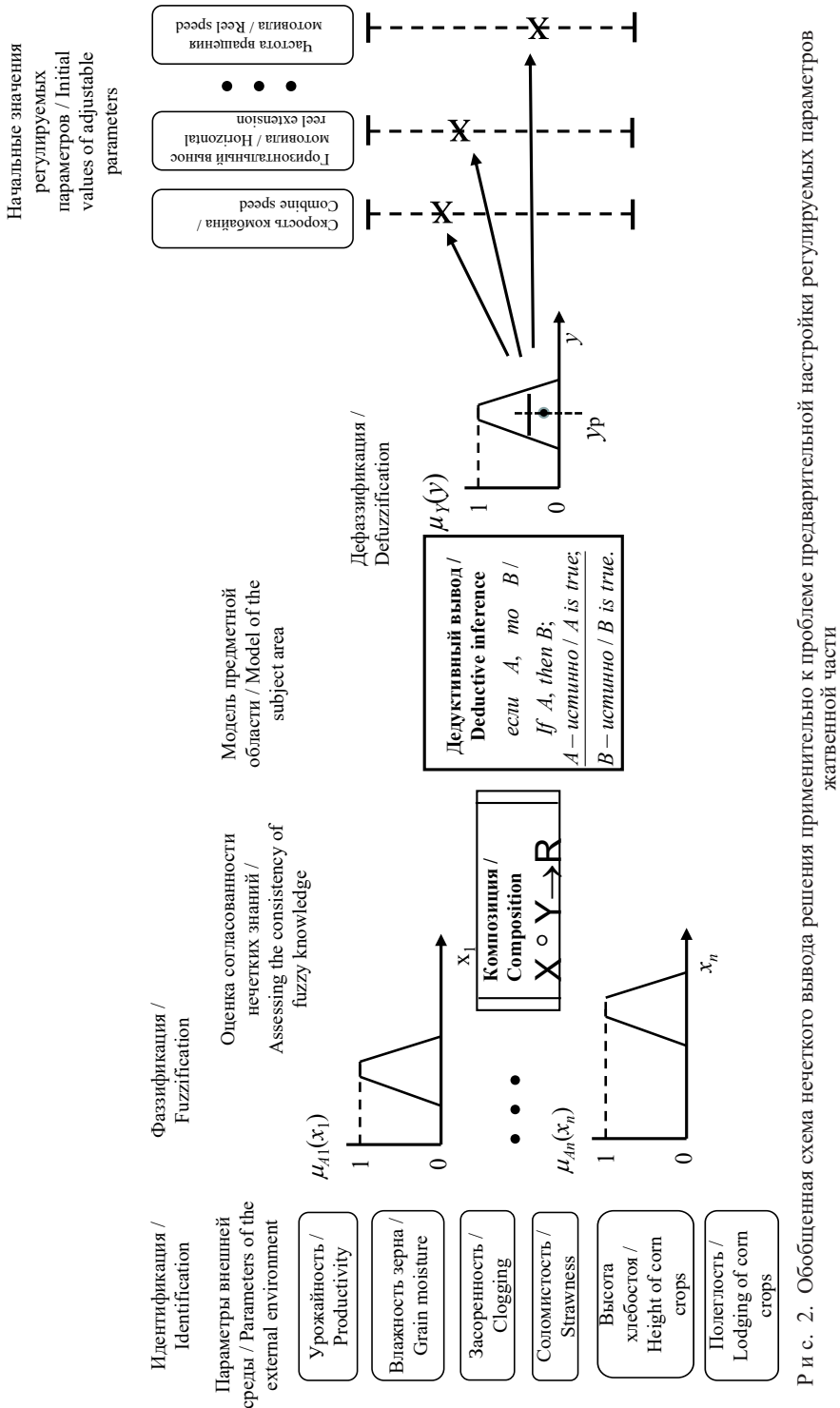
На рисунке 4 приведено несколько графиков ФП рассматриваемых ЛП.

На основе частных ФП построена обобщенная ФП для всех ЛП, которые используются при разработке базы продукционных правил.

⁴ Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления / И. М. Макаров [и др.]. Москва : Наука, 2006. 333 с.



Р и с. 1. Структурная схема метода предварительной настройки параметров жатвенной части
 Fig. 1. Block diagram of the preset adjusting method of the combine harvester cutting unit



Р и с. 2. Обобщенная схема нечеткого вывода решения применительно к проблеме предварительной настройки регулируемых параметров жатвенной части

F i g. 2. Generalized scheme of fuzzy inference of the solution in relation to the problem of the adjustable harvester header parameters presetting

Т а б л и ц а 1
T a b l e 1

Описание лингвистических переменных
Tuples of the linguistic variables

Кортежи ЛП / Linguistic variable tuples	Условное обозначение / Unit designation
<Урожайность 40 ц/га {Менее 40, Примерно 40, Более 40}, 34–46> / <Productivity of 40 centners/ha {Less than 40, Approximately 40, More than 40}, 34–46>	УР = {УРМ40, УРП40, УРБ40}
<Влажность хлебостоя,% {Сухой; Нормальный, Влажный}, 0–20> / <Humidity of corn crops,% {Dry; Normal, Wet}, 0–20>	ВС = {СХ, НОРХ, ВЛХ}
<Соломистость, % {Малая, Нормальная}, 40–70> / <Strawiness, % {Small, Normal}, 40–70>	СОЛ = {МСОЛ, НСОЛ}
<Засоренность хлебостоя, % {Низкая, Большая}, 0–40> / <Wildage of corn crops, % {Low, Large}, 0–40>	ЗХ = {НЗХ, БЗХ}
<Высота хлебостоя, см {Низкорослый, Ниже среднего, Средний, Высокий}, 30–120> / <Height of corn crops, cm {Low, Below average, Medium, High}, 30–120>	ВысХ = {НХ, НСрХ, СрХ, ВХ}
<Полеглость хлебостоя, % {Прямостоящий, Низкая, Средняя, Высокая}, 0–40> / <Lodging of corn crops, % {Right, Low, Medium, High}, 0–40>	ПХ = {ППХ, НПХ, СПХ, ВПХ}
<Спутанность хлебостоя, % {Нормальный, Спутанный}, 0–40> / <Confusion of corn crops, % {Normal, Confused}, 0–40>	СХ = {НСХ, ССХ}
<Густота хлебостоя, стеб./м ² {Разреженный, Ниже среднего, Средний, Густой}, 100–1 000> / <Density of corn crops, stems/m ² {Fragile, Below average, Medium, Dense}, 100–1,000>	ГХ = {ГРХ, НСрХ, СГХ, ГГХ}
<Положение мотовила по высоте, см {Очень низкое, Низкое, Среднее, Высокое}, –10–110> / <Reel height position, cm {Very low, Low, Medium, High}, –10–110>	МПВ = {ОН, Н, С, В}
<Положение мотовила по горизонтали, см {Незначительный, Ниже среднего, Средний, Дальний}, 20–70> / <Reel horizontal position, cm {Significant, Below average, Medium, Far}, 20–70>	МПГ = {Н, НС, С, Д}

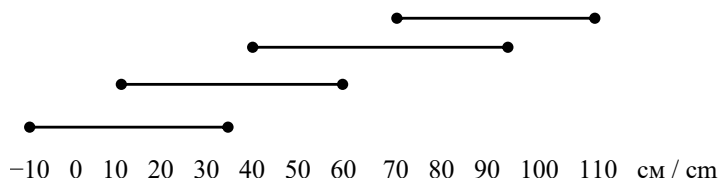
Положение мотовила по высоте / Height position of reel:

–10–35 очень низкое / –10–35 very low

10–60 низкое / 10–60 low

40–95 среднее / 40–95 average

70–110 высокое / 70–110 high



Р и с. 3. Границы термов ЛП «положение мотовила по высоте»

F i g. 3. Limits of the terms of the linguistic variable “Reel vertical position”

Матрица K парной согласованности и показатели k и \tilde{k} общей согласованности
Matrix K of pair consistency and Indices k and \tilde{k} of overall consistency

ЛП / Linguistic Variable	Матрица K / Matrix K				k	\tilde{k}
«Соломистость хлебостоя» / “Strawness of corn crops”	1,000	0,667	0,667	0,964	0,699	0,677
	0,667	1,000	0,946	0,667		
	0,667	0,946	1,000	0,667		
	0,964	0,667	0,667	1,000		
«Высота хлебостоя» / “Height of corn crops”	1,000	0,945	0,901	0,812	0,812	0,812
	0,945	1,000	0,951	0,862		
	0,901	0,951	1,000	0,911		
	0,812	0,862	0,911	1,000		
«Полеглость хлебостоя» / “Lodging of corn crops”	1,000	0,868	0,856	0,929	0,820	0,812
	0,868	1,000	0,912	0,839		
	0,856	0,912	1,000	0,927		
	0,929	0,839	0,927	1,000		
«Густота хлебостоя» / “Density of corn crops”	1,000	0,958	0,896	0,872	0,787	0,779
	0,958	1,000	0,857	0,832		
	0,896	0,857	1,000	0,867		
	0,872	0,832	0,867	1,000		
«Положение мотовила по высоте» / “Reel height position”	1,000	0,868	0,868	0,874	0,850	0,840
	0,868	1,000	1,000	0,747		
	0,868	1,000	1,000	0,747		
	0,874	0,747	0,747	1,000		
«Положение мотовила по горизонтالي» / “Reel horizontal position”	1,000	0,860	0,860	0,892	0,880	0,870
	0,860	1,000	0,960	0,810		
	0,860	0,960	1,000	0,920		
	0,892	0,810	0,920	1,000		

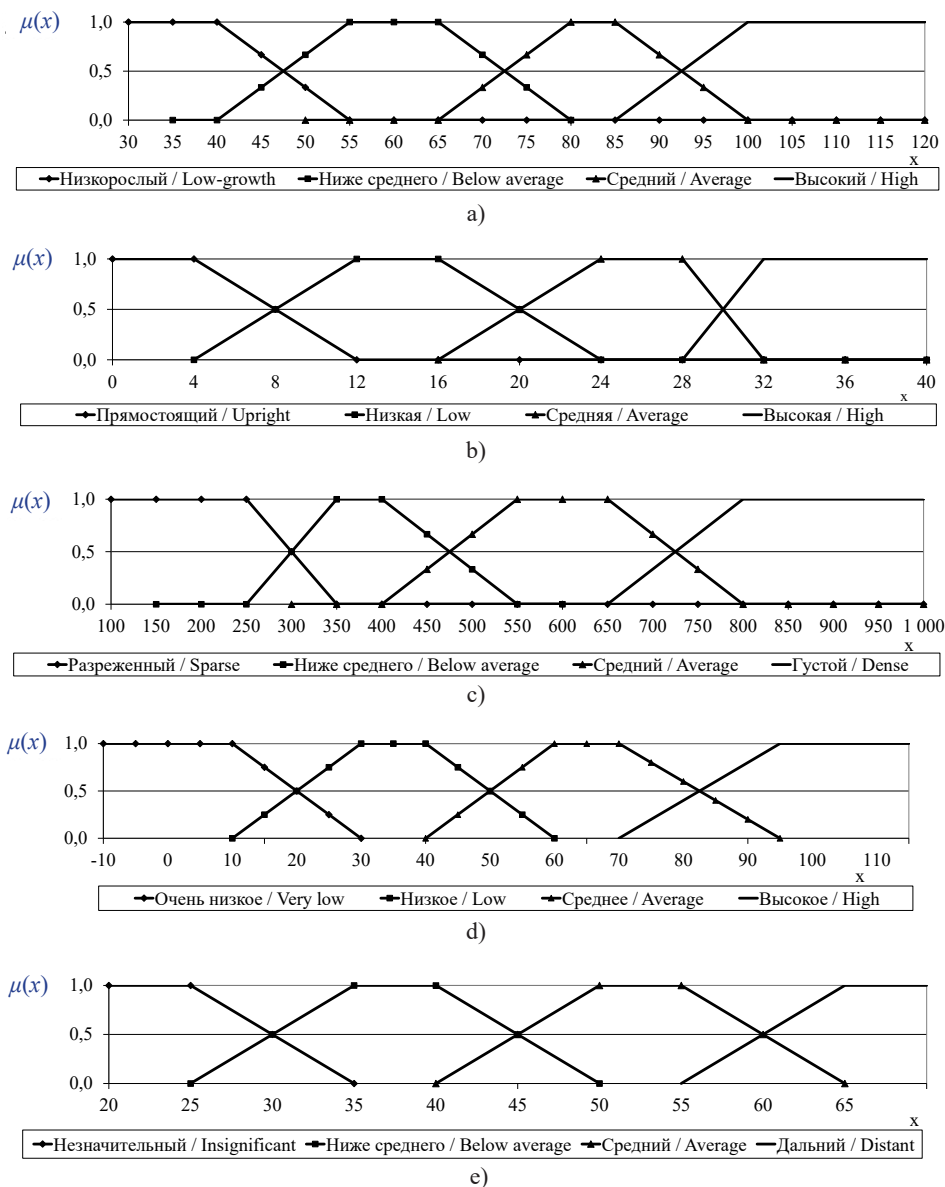
На основе методики формирования базы знаний создана система производственных правил. Она имеет разветвленную иерархическую структуру, которая на первом уровне делится по убираемым культурам, на следующем уровне для ряда культур (например, пшеница) целесообразно выделять урожайность. Систему сложных взаимосвязей входных и выходных параметров, отраженных в правилах, иллюстрирует рисунок 5.

База знаний сформулирована для каждой культуры и регулируемого параметра, коэффициент достоверности правил равен 1. Например, для пшеницы с урожайностью примерно 40 ц/га

и выходной ЛП «положение мотовила по высоте» база знаний содержит 128 правил вида:

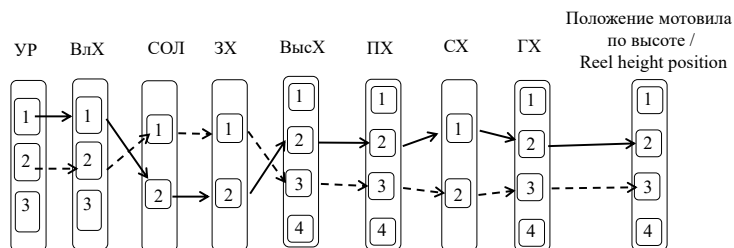
ЕСЛИ <высота хлебостоя «низкорослый», и полеглость хлебостоя «прямостоящий», и спутанность хлебостоя «нормальный», и густота хлебостоя «разреженный», ТО положение мотовила по высоте «очень низкое»>.

Нечеткий логический вывод каждого из регулируемых параметров основан на созданной базе знаний и выполняется согласно формуле (1), а точное его значение для определенной комбинации внешних факторов может быть получено методом центра тяжести.



Р и с. 4. Графики функции принадлежности термов ЛП: а) «Высота хлебостоя»; б) «Полеглость хлебостоя»; с) «Густота хлебостоя»; д) «Положение мотовила по высоте»; е) «Положение мотовила по горизонтали»

F i g. 4. Graphs of membership functions of the terms of the linguistic variables: а) “Height of corn crops”; б) “Lodging of corn crops”; с) “Density of corn crops”; д) “Reel vertical position”; е) “Reel horizontal position”



Р и с. 5. Система взаимосвязей входных ЛП и выходной ЛП «положение мотовила по высоте». Условные обозначения, используемые на рисунке, расшифрованы в таблице 1

F i g. 5. The system of interrelationships of input linguistic variables and output linguistic variable “Reel vertical position”. The symbols used in the figure are shown in Table 1

Обсуждение и заключение

Разработан метод выбора начальных параметров жатвенной части комбайна. В рамках предложенного подхода подробно рассмотрены элементы формально-логической схемы вывода решений. Даны лингвистические описания значимых внешних факторов и параметров настройки, выбраны оптимальные модели на основе показателей согласованности, создана база нечетких экспертных знаний. Полученные результаты, совместно с аналогичными разработками по настройке параметров

других рабочих органов комбайна, составляют основу для дальнейшей разработки интеллектуальной информационной системы принятия решений по предварительной настройке регулируемых параметров комбайна, которая существенно облегчает работу оператора. В перспективе развитие таких систем предполагает подключение датчиков мониторинга внешних условий уборки и показателей качества уборки и автоматизированной системы анализа изображений для оперативной корректировки регулируемых параметров.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ерохин С. Н., Решетов А. С. Потери эффективности уборки зерновых культур в сельхоз-предприятии // Наука в центральной России. 2013. № 1. С. 40–44. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19129807> (дата обращения: 19.08.2022).
2. Способ регулирования параметров зерноуборочного комбайна в процессе уборки : авторское свидетельство 1410892 СССР / Нелюбов А. И. [и др.] № 4159504 ; заявл. 20.11.1986 ; опубл. 23.07.1988. 2 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=40483958> (дата обращения: 19.08.2022).
3. Оптимальное регулирование зерноуборочного комбайна (Электронный «Советчик комбайнера») / Е. В. Ветров [и др.] // Труды. 1989. № 4. С. 80–85.
4. Бердышев В. Е. Оптимизация конструктивно-технологических параметров «классической» молотильно-сепарирующей системы зерноуборочного комбайна // Известия нижеволжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2012. № 3. С. 175–178. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17954643> (дата обращения: 19.08.2022).
5. Царев Ю. А., Трасковский С. С. Методика определения диапазонов регулирования параметров настройки зерноуборочных комбайнов // Вестник Донского государственного технического университета. 2009. Т. 9, № 4. С. 206–211. URL: <https://www.vestnik-donstu.ru/jour/article/view/1194/1186> (дата обращения: 19.08.2022).

6. Царев Ю. А., Джигарханов Д. Г. Автоматизация системы настройки технологического процесса зерноуборочного комбайна // Тракторы и сельхозмашины. 2009. № 12. С. 29–31. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13007075> (дата обращения: 19.08.2022).
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. Modelling Fuzzy Combination of Remote Sensing Vegetation Index for Durum Wheat Crop Analysis / T. Semeraro [et al.] // Computers and Electronics in Agriculture. 2019. Vol. 156. P. 684–692. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.027>
9. Turan I. D., Dengiz O., Ozkan B. Spatial Assessment and Mapping of Soil Quality Index for Desertification in the Semi-Arid Terrestrial Ecosystem Using MCDM in Interval Type-2 Fuzzy Environment [Электронный ресурс] // Computers and Electronics in Agriculture. 2019. Vol. 164. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104933>
10. Prabakaran G., Vaithiyathan D., Ganesan M. Fuzzy Decision Support System for Improving the Crop Productivity and Efficient Use of Fertilizers // Computers and Electronics in Agriculture. 2018. Vol. 150. P. 88–97. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.03.030>
11. Dimitrov V., Borisova L., Nurutdinova I. Intelligent Support of Grain Harvester Technological Adjustment in the Field // Proceedings of the Third International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (ITI’18). ITI’18 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 875. Cham : Springer, 2019. P. 236–245. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-01821-4_25
12. 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>
13. 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.biosystemseng.2009.12.012>
14. Выбор стратегии в задаче корректировки регулировочных параметров комбайна / Л. В. Борисова [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2020. Т. 30, № 1. С. 60–75. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202001.060-075>
15. Borisova L. V., Nurutdinova I. N., Dimitrov V. P. Fuzzy Logic Inference of Technological Parameters of the Combine-Harvester // WSEAS Transaction on Systems. 2015. Vol. 14. P. 278–285. URL: <https://wseas.org/multimedia/journals/systems/2015/a525802-095.pdf> (дата обращения: 19.08.2022).
16. Borisova L., Dimitrov V., Nurutdinova I. Algorithm for Assessing Quality of Fuzzy Expert Information // Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS’2017) (September 27 – October 2 2017). Novi Sad, 2017. P. 319–322. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8110107/> (дата обращения: 19.08.2022).
17. Dimitrov V., Borisova L., Nurutdinova I. Development and Analysis of Fuzzy Expert Data for Technological Adjustment of a Grain Harvester Header [Электронный ресурс] // E3S Web Conf. XIII International Scientific and Practical Conference “State and Prospects for the Development of Agribusiness – INTERAGROMASH”. Vol. 175. 2020. URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2020/35/e3sconf_interagromash2020_05027/e3sconf_interagromash2020_05027.html (дата обращения: 19.08.2022).
18. Димитров В. П., Борисова Л. В., Нурутдинова И. Н. Лингвистическое описание процесса технологической настройки сельхозагрегатов // Вестник Аграрной науки Дона. 2017. № 1–1. С. 65–79. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29059989> (дата обращения: 19.08.2022).
19. Программная система для ввода экспертных знаний / В. П. Димитров [и др.] // Вестник Донского государственного технического университета. 2011. Т. 11, № 1. С. 83–90. URL: <https://clck.ru/32gQdb> (дата обращения: 19.08.2022).

Поступила 25.08.2022; одобрена после рецензирования 14.11.2022; принята к публикации 21.11.2022

Об авторах:

Димитров Валерий Петрович, заведующий кафедрой управления качеством Донского государственного технического университета (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), доктор технических наук, профессор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1439-1674>, Researcher ID: E-4908-2018, Scopus ID: 57195505958, kaf-qm@donstu.ru

Борисова Людмила Викторовна, заведующий кафедрой менеджмента и бизнес-процессов Донского государственного технического университета (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), доктор технических наук, профессор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6611-4594>, Researcher ID: E-4863-2018, borisovalv09@mail.ru

Нурудинова Инна Николаевна, доцент кафедры прикладной математики Донского государственного технического университета (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), кандидат физико-математических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3375-1295>, nurut.inna@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

В. П. Димитров – анализ предметной области, разработка общей методики.

Л. В. Борисова – моделирование нечетких экспертных знаний.

И. Н. Нурудинова – расчет показателей согласованности, выбор оптимальных моделей.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Erokhin G.N., Reshetov A.S. Efficiency Losses Harvesting Cereal Crops in Agricultural. *Science in the Central Russia*. 2013;(1):40–44. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19129807> (accessed 19.08.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
2. Nyelyubov A.I., Gyenkin M.D., Bandurovskiy V.I. [A Way to Regulate the Parameters of a Combine Harvester During Harvesting]. Author's Certificate 1,410,892 USSR. 1988 July 23. 2 p. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=40483958> (accessed 19.08.2022). (In Russ.)
3. Vetrov Ye.V., Chernyavskaya V.P., Bobrineva G.F., et al. [Optimal Adjustment of the Combine Harvester (Electronic "Harvester Adviser")]. *Trudy*. 1989;(4):80–85. (In Russ.)
4. Berdyshev V.Ye. [Optimization of Design and Technological Parameters of the "Classic" Threshing and Separating System of Grain Harvester]. *Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education*. 2012;(3):175–178. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17954643> (accessed 19.08.2022). (In Russ.)
5. Tsarev J.A., Traskovski S.S. Technique of Definition of Control Bands of Parametres of Customisation of Combine Harvesters. *Vestnik of Don State Technical University*. 2009;9(4):206–211. Available at: <https://www.vestnik-donstu.ru/jour/article/view/1194/1186> (accessed 19.08.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
6. Tsarev Yu.A., Dzhigarkhanov D.G. Automation of Tuning System of Technological Process for a Grain Combine Harvester. *Traktory i Selkhoz mashiny*. 2009;(12):29–31. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13007075> (accessed 19.08.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
7. Sujaritha M., Annadurai S., Satheeshkumar J., et al. 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. Semeraro T., Mastroleo G., Pomes A., et al. Modelling Fuzzy Combination of Remote Sensing Vegetation Index for Durum Wheat Crop Analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019;156:684–692. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.027>
9. Turan I.D., Dengiz O., Ozkan B. Spatial Assessment and Mapping of Soil Quality Index for Desertification in the Semi-Arid Terrestrial Ecosystem Using MCDM in Interval Type-2 Fuzzy Environment. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019;164. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104933>

10. Prabakaran G., Vaithiyathan D., Ganesan M. Fuzzy Decision Support System for Improving the Crop Productivity and Efficient Use of Fertilizers. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018;150:88–97. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.03.030>
11. Dimitrov V., Borisova L., Nurutdinova I. Intelligent Support of Grain Harvester Technological Adjustment in the Field. In: Proceedings of the Third International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (ITI'18). ITI'18 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 875. Cham: Springer; 2019. p. 236–245. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-01821-4_25
12. Omid M., Lashgari M., Mobli H., et al. 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>
13. Craessaerts G., de Baerdemaeker J., Missotten B., Saeyns 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>
14. Borisova L.V., Nurutdinova I.N., Dimitrov V.P., et al. Selecting a Strategy for Determining the Combine Harvester Parameter Settings. *Engineering Technologies and Systems*. 2020;30(1):60–75. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202001.060-075>
15. Borisova L.V., Nurutdinova I.N., Dimitrov V.P. Fuzzy Logic Inference of Technological Parameters of the Combine-Harvester. *WSEAS Transaction on Systems*. 2015;14:278–285. Available at: <https://wseas.org/multimedia/journals/systems/2015/a525802-095.pdf> (accessed 19.08.2022).
16. Borisova L., Dimitrov V., Nurutdinova I. Algorithm for Assessing Quality of Fuzzy Expert Information. In: Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017) (September 27 – October 2 2017). Novi Sad; 2017. p. 319–322. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8110107/> (accessed 19.08.2022).
17. Dimitrov V., Borisova L., Nurutdinova I. Development and Analysis of Fuzzy Expert Data for Technological Adjustment of a Grain Harvester Header. In: E3S Web Conf. XIII International Scientific and Practical Conference “State and Prospects for the Development of Agribusiness – INTERAGROMASH”. Vol. 175. 2020. Available at: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2020/35/e3sconf_interagromash2020_05027/e3sconf_interagromash2020_05027.html (accessed 19.08.2022).
18. Dimitrov V.P., Borisova L.V., Nurutdinova I.N. [Linguistic Description of the Process of Technological Adjustment of Agricultural Aggregates]. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2017;(1–1):65–79. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29059989> (accessed 19.08.2022). (In Russ.)
19. Dimitrov V.P., Borisova L.V., Nurutdinova I.N. Program System for Expert Knowledge Input. *Vestnik of Don State Technical University*. 2011;11(1):83–90. Available at: <https://clck.ru/32gQdb> (accessed 19.08.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

Submitted 25.08.2022; approved after reviewing 14.11.2022; accepted for publication 21.11.2022

About the authors:

Valeriy P. Dimitrov, Head of the Chair of Quality Management, Don State Technical University (1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don 344000, Russian Federation), Dr.Sci. (Engr.), Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1439-1674>, Researcher ID: E-4908-2018, Scopus ID: 57195505958, 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, Russian Federation), Dr.Sci. (Engr.), Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6611-4594>, Researcher ID: E-4863-2018, borisovalv09@mail.ru

Inna N. Nurutdinova, Associate Professor of Applied Mathematics Chair, Don State Technical University (1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don 344000, Russian Federation), Cand.Sci (Phys.-Math.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3375-1295>, nurut.inna@yandex.ru

Contribution of the authors:

V. P. Dimitrov – analysis of the subject area, development of a general methodology.

L. V. Borisova – modeling of fuzzy expert knowledge.

I. N. Nurutdinova – calculation of consistency indicators, selection of optimal models.

All authors have read and approved the final manuscript.