



Выбор стратегии в задаче корректировки регулировочных параметров комбайна

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

А. К. Тугенгольд

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

*kaf-qm@donstu.ru

Введение. В статье рассматривается задача корректировки регулировочных параметров рабочих органов зерноуборочного комбайна, функционирующего в меняющихся внешних условиях. Для технологической регулировки сложных иерархических многоуровневых систем, к которым относятся комбайны, широко применяются интеллектуальные информационные системы, основанные на нечеткой экспертной информации. При проведении технологической настройки комбайна в процессе уборки анализируется поступающая количественная, качественная и оценочная информация. Различные виды неопределенности при рассмотрении семантических пространств факторов внешней среды и регулируемых параметров машины обуславливают применение логико-лингвистического подхода и математического аппарата нечеткой логики для нахождения оптимальных начальных значений регулируемых параметров. Сложная система взаимосвязей между регулировочными параметрами, показателями качества уборки урожая и факторами внешней среды обуславливает необходимость корректировки параметров рабочих органов комбайна в процессе уборки. Эту функцию выполняет блок корректировки в интеллектуальной системе поддержки принятия решений. В настоящей статье подробно рассмотрены вопросы создания базы знаний для корректировки регулировочных параметров в случаях, когда наблюдаются отклонения значений показателей качества уборки от нормативных.

Материалы и методы. Поскольку причин появления нарушения много и заранее неизвестно, какая из них привела к отклонению, то способов реагирования на них тоже достаточно много. Взаимосвязи между показателями качества работы и регулируемыми параметрами устанавливаются в основном эмпирическими правилами, полученными на основе сбора и анализа экспертной информации. Для оптимизации работы механизма вывода интеллектуальной информационной системы (сокращения времени принятия решения) возникает необходимость установления значимости используемых правил базы знаний. Для решения этой задачи привлечен теоретико-игровой подход, введены понятия матрицы показателей эффективности и матрицы рисков принятия неэффективного решения, позволяющие использовать критерии оптимальности.

Результаты исследования. Приведен пример выбора стратегии поиска адекватного реагирования на появление нарушения показателей уборки в виде «потери щуплого зерна с половой». Рассмотрен выбор стратегий реагирования на нарушение на основе критериев Лапласа, математического ожидания и критерия Сэвиджа, используемых для принятия решений в «играх с природой». Проиллюстрирована методика процедуры принятия решения в рассматриваемой задаче с применением указанных критериев, проведен анализ полученных результатов.

© Борисова Л. В., Нурутдинова И. Н., Димитров В. П., Тугенгольд А. К., 2020



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

Обсуждение и заключение. Предложенный подход существенно повышает результативность работы блока корректировки интеллектуальной системы. Он позволяет структурировать базу экспертных знаний и устанавливать оптимальную последовательность применения продукционных правил, что обеспечивает эффективность процесса корректировки регулируемых параметров комбайна, а также сокращает время принятия решений. Данный подход может быть использован при решении проблем корректировки технологических настроек в различных технических системах и устройствах, а также для поиска причин возникающих в них неисправностей.

Ключевые слова: интеллектуальная информационная система, принятие решений, зерноуборочный комбайн, технологическая регулировка, лингвистическая переменная, функция принадлежности

Для цитирования: Борисова, Л. В. Выбор стратегии в задаче корректировки регулировочных параметров комбайна / Л. В. Борисова, И. Н. Нурутдинова, В. П. Димитров [и др.]. – DOI 10.15507/2658-4123.030.202001.060-075 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 1. – С. 60–75.

Selecting a Strategy for Determining the Combine Harvester Parameter Settings

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

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

* *kaf-qm@donstu.ru*

Introduction. The article deals with adjusting the parameter settings of a combine harvester working bodies. For adjustment of complex hierarchical multilevel systems, the intellectual methods based on fuzzy expert information are used. The incoming quantitative, qualitative and evaluation information is analyzed when adjusting the combine harvester. The different types of uncertainty in considering semantic spaces of external environment factors and regulated parameters of the machine cause the application of logical and linguistic approach and mathematical apparatus of fuzzy logic for determining the optimal initial settings. The complex system of interrelations between parameters, indicators of quality of harvest, and factors of external environment causes the necessity to adjust the parameters of combine working elements in the process of harvesting. This function is performed by the correction unit in the intelligent decision support system. In the present article, the questions of creating a knowledge base for correcting adjustment parameters in cases when there are deviations of values of harvesting quality indicators from normative values are considered in detail.

Materials and Methods. Interrelations between performance indicators and regulated parameters are established by empirical rules obtained through the collection and analysis of expert information. To optimize the mechanism of intellectual information system output and reduce the time of decision making, there is a necessity to establish the relevance of used knowledge base rules. To solve this problem, theoretical and game approaches are used, concepts of the matrix of performance indicators and the matrix of risks of making an inefficient decision are used.

Results. An example of choosing a strategy of searching for an adequate response to the fault of the harvesting indices in the form of “losses of feeble grain with chaff” has been given. The choice of fault response strategies on the basis of Laplace criterion, expected-value criterion, and Savage test used for decision-making in “games with nature” has been considered. The method of the decision-making process in the problem under consideration with the application of the mentioned criteria were illustrated, the analysis of the obtained results was carried out.

Discussion and Conclusion. The suggested approach substantially increases performance of the unit of intelligent system updating. It allows structuring the expert knowledge base and establishing an optimal sequence of application of production rules; this provides efficiency of the updating process of the adjustable harvester parameters and also reduces the time for decision-making. This approach can be used while solving the problems of updating technological adjustments in different technical systems and devices.

Keywords: intelligent information system, decision-making, combine harvester, technological adjustment, linguistic variable, membership function

For citation: Borisova L.V., Nurutdinova I.N., Dimitrov V.P., et al. Selecting a Strategy for Determining the Combine Harvester Parameter Settings. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(1):60-75. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202001.060-075>

Введение

Эффективность уборочных работ в значительной степени определяется установленными значениями регулируемых параметров зернокомбайна. Недостаточно точная предварительная технологическая настройка рабочих органов комбайна, неработоспособное состояние его агрегатов, изменение внешних условий приводят к снижению показателей качества уборочных работ, что проявляется в значительных потерях, дроблении зерна и т.п.¹ Оперативно найденная причина нарушения качества работы и соответствующая корректировка параметров функционирования комбайна в полевых условиях позволят избежать значительных потерь финансовых и трудовых ресурсов [1]. Этим обусловлена актуальность задачи создания блока корректировки в интеллектуальной информационной системе (ИИС), который предназначен для обнаружения нарушений качества уборки и оперативной корректировки технологических настроек рабочих органов комбайна. Место задачи корректировки регулируемых параметров комбайна показано на рисунке 1. На основании экспертной оценки внешних факторов, а также нечеткой базы знаний, решается задача предварительной настройки регулируемых парамет-

тров комбайна. Среди этих параметров для иллюстрации выбрана частота вращения вентилятора очистки (ЧВВО). Выявление нарушений показателей качества уборки обуславливает необходимость корректировки параметров.

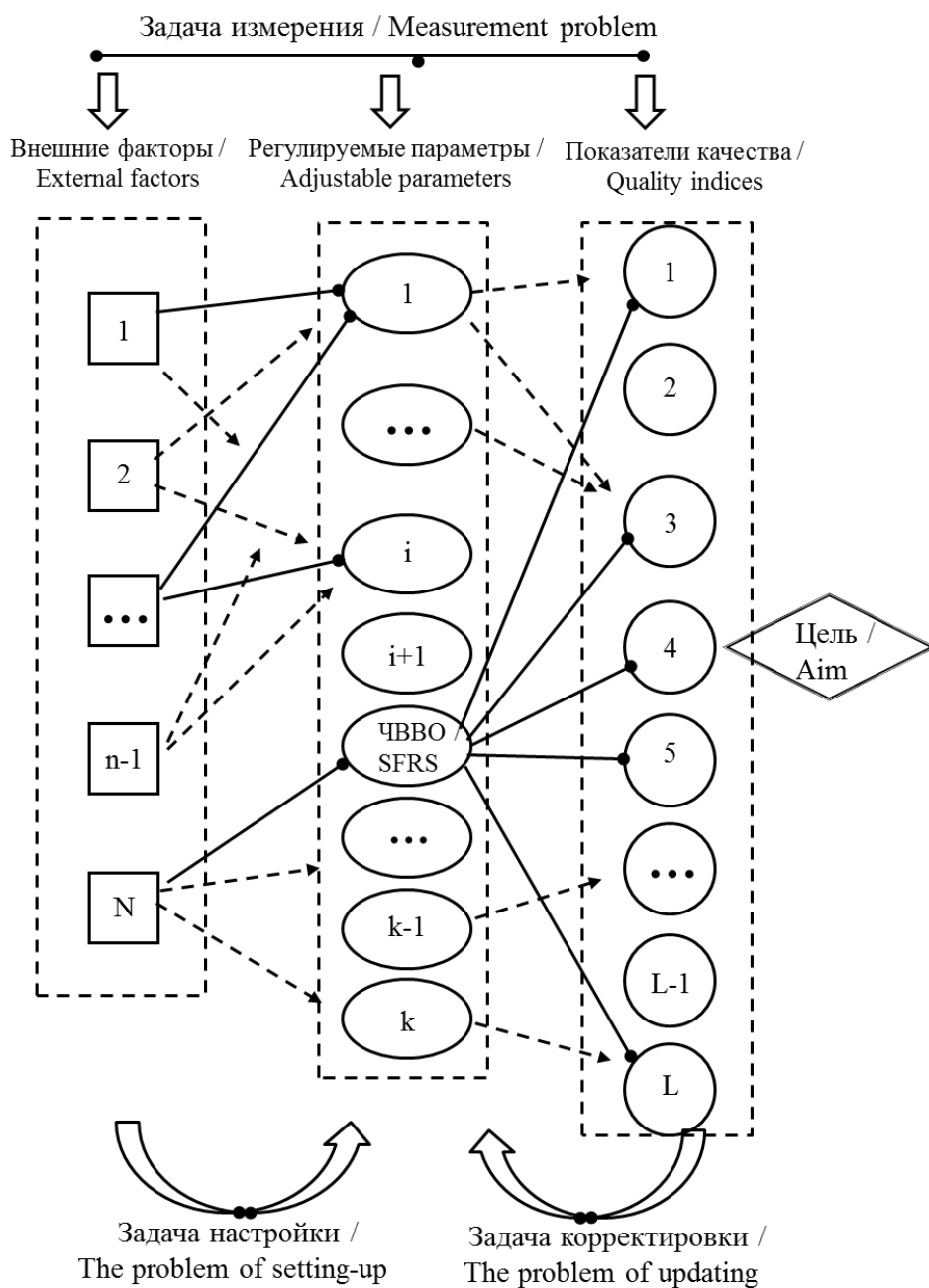
Данная статья посвящена проблемам формирования экспертной информации для блока корректировки ИИС, предназначенной для поддержки принятия решений о параметрах технологической настройки комбайна в полевых условиях.

Обзор литературы

В ряде работ подробно рассмотрены проблемы выбора значений регулируемых параметров комбайна [2–5], описан алгоритм работы блока предварительной настройки ИИС управления комбайном [2; 6]. Не менее важной задачей является оперативная корректировка технологических настроек в случае обнаружения нарушений качества уборки.

Комбайн относится к многоуровневым иерархическим системам, функционирующим в меняющихся внешних условиях. Экспертная информация о внешних условиях, а также о взаимосвязях этих условий и регулируемых параметров комбайна носит нечеткий характер. Очевидно, что для описания таких систем использование традици-

¹ Рыбалко А. Г. Особенности уборки высокоурожайных зерновых культур (настройка и регулировка машин): учебное пособие. М.: Агропромиздат, 1988. 120 с.



Р и с. 1. Задача корректировки параметров в общей схеме технологической регулировки комбайна

F i g. 1. Diagram showing position of the problem of updating adjustable parameters

онных математических подходов, таких как регрессионные модели [7–9], экспериментально-статистические методы [1; 10], малоэффективно в силу того, что получающиеся в них громоздкие математические конструкции сложно или даже невозможно оптимизировать. Помимо этого, нужно отметить еще два существенных ограничения для использования подобных подходов. Во-первых, регрессионные модели применимы только в рассматриваемом диапазоне параметров модели; во-вторых, решения об изменении значений параметров должны приниматься оперативно в полевых условиях на основе большого числа внешних факторов, которые не учитываются в модели.

Для описания процессов принятия решений и контроля технологических процессов в подобных сложных системах используется математический аппарат теории нечетких множеств [11; 12]. Он позволяет оперировать нечеткими ограничениями и целями, задавать их с помощью лингвистических переменных.

Материалы и методы

Эффективность принятия решения на основе нечетких моделей существенно зависит от того, насколько экспертная информация адекватна реальной ситуации. Применительно к рассматриваемой задаче корректировки параметров комбайна требование адекватности экспертной информации включает в себя целый ряд аспектов, среди которых, во-первых, оценка причин нарушения качества технологического процесса уборки; во-вторых, установление возможных вариантов реагирования (стратегий), то есть прописывание нечетких продукционных правил их последовательности в соответствии с оценкой эффективности каждой из стратегий.

В иерархии решения задачи оперативной корректировки технологических регулировок первый уровень занимает выявление причин нарушений

качества работы. Система взаимосвязей между внешними признаками нарушения процесса уборки урожая, причинами, приводящими к этим признакам, и способами устранения нарушений носит сложный, не всегда однозначный характер. В результате исследований установлена идентификация взаимосвязей, указано 40 внешних признаков нарушения технологического процесса [13]. Как правило, появление нарушения показателя технологического процесса обусловлено влиянием 5 и более регулировочных параметров, а также параметров технического состояния агрегата или рабочего органа. Наличие двух групп факторов, между которыми существует неоднозначная система взаимосвязей, усложняет задачу технологической корректировки.

Следующий уровень в иерархии решения задачи корректировки занимает выбор стратегии реагирования на отклонение показателей качества работы от номинальных значений. Принятие решений об изменении регулировочных параметров осложняется рядом обстоятельств, наиболее значимые из которых:

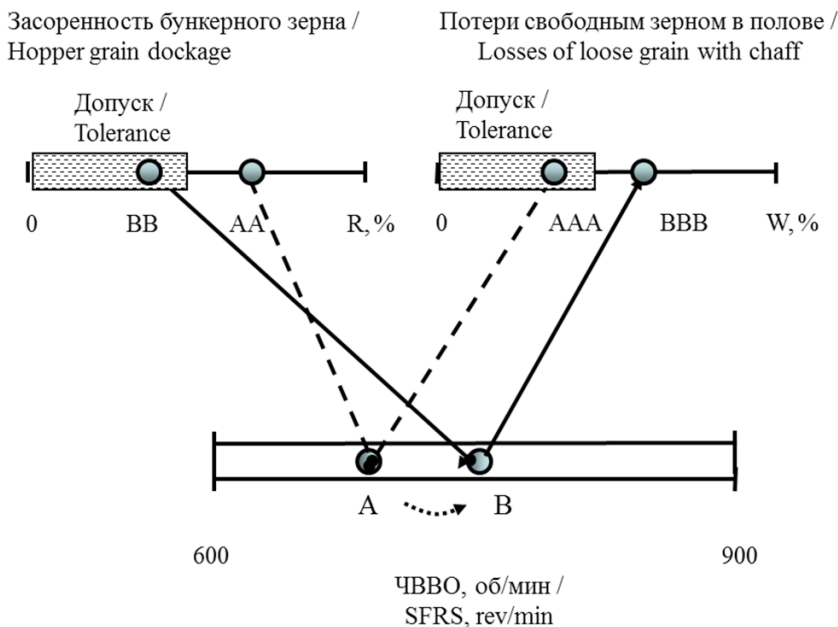
- возможность одновременного наличия нескольких нарушений качества работы;
- возможность существования нескольких причин одного и того же нарушения;
- наличие нескольких вариантов устранения нарушения;
- неизвестность точной причины нарушения.

Формализация процесса принятия решения о корректировке технологических регулировок комбайна носит гибридный характер. Для построения иерархического дерева решений целесообразно использование экспертного подхода, базирующегося на нечетких экспертных знаниях, а для оценки эффективности выбранных стратегий принятия – применение критериев «игр с природой».

Задача корректировки осложняется наличием перекрестных зависимостей между регулировочными параметрами и показателями качества работы. Для иллюстрации этих зависимостей на рисунке 2 в качестве регулируемого параметра представлена ЧВВО. На горизонтальной шкале приведены рекомендуемые границы изменения значений ЧВВО для конкретной культуры (например, 600–850 об/мин). Примем, что в соответствии с конкретными целями уборки и внешними условиями значение ЧВВО соответствует точке А. На вертикальных шкалах (в целях упрощенного представления условий задачи) представлены только 2 показателя качества – «засоренность бункерного зерна» и «потери свободным зерном с половею». На каждой из этих шкал приведены границы изменчивости показателя качества и условно отображены границы допустимых значений данного показателя в соответствии с агротехническими требованиями (допуск).

Предположим, обнаружено, что значение показателя «засоренность бункерного зерна» превышает допустимое значение (точка АА). Одновременно значение показателя качества «потери свободным зерном с половею» находится в допуске и соответствует точке ААА. Для того чтобы устранить нарушение («засоренность бункерного зерна»), необходимо увеличить значение ЧВВО (из точки А перейти в точку В). В этом случае значение показателя «засоренность бункерного зерна» входит в допуск (точка ВВ), но возможно, что значение второго показателя качества «потери свободным зерном с половею» увеличится (точка ВВВ). Таким образом, выявляется сложность процесса корректировки, так как при устранении одного нарушения возможно появление другого.

Для построения математической модели реальной системы и протекающих в ней процессов технологической регулировки необходимо установить



Р и с. 2. Схема взаимосвязи: регулируемый параметр – показатель качества

F i g. 2. The diagram of the interrelation: adjustable parameter – quality index

достаточную степень абстракции. Поэтому будем считать, что система обладает следующими свойствами:

1. За достаточно малый промежуток времени появление более чем одного внешнего признака нарушения качества технологического процесса невозможно.

2. Заранее известна значимость вклада технических и регулировочных параметров системы в вероятность отклонения значения параметра качества техпроцесса.

Остановимся более подробно на данных свойствах, поскольку они лежат в основе модели. Свойство 1 обеспечивает возможность использования экспертной информации о формах реагирования на признак нарушения в некоторой системе предпочтений. Наличие более чем одного признака нарушений требует создания значительно более сложной, учитывающей возможную корреляцию, системы экспертной информации. На начальном этапе в этом нет необходимости, что обеспечивается малостью рассматриваемого промежутка времени. Свойство 2 предполагает наличие базы знаний о зависимостях признаков нарушения техпроцесса от регулировочных параметров. Эта база знаний представляет собой иерархически структурированную информацию, сформированную на основе экспертных знаний и теоретических соображений.

Экспертная информация устанавливает связи между семантическими группами признаков предметной области в виде системы лингвистических нечетких высказываний. В данной задаче система высказываний – это эмпирические правила, определяющие зависимость показателей качества технологического процесса уборки от множества регулировочных параметров рабочих органов комбайна.

Для решения задачи корректировки воспользуемся логико-лингвистическим подходом [13; 14]. Множества входных

признаков образуют регулировочные параметры комбайна, в качестве выходного признака будем рассматривать один из показателей качества уборки. В ряде работ представлена модель рассматриваемой предметной области в виде композиции нечетких отношений [13–15].

Пусть в процессе эксплуатации зерноуборочного комбайна обнаружено отклонение показателя качества работы, которое может быть обусловлено как изменением внешних условий, так и изменением технического состояния комбайна. Для принятия решения о корректировке регулировочных параметров комбайна необходима база знаний в виде системы логических высказываний, содержащих экспертную информацию о возможных вариантах корректировки. Рассмотрим механизм формирования последовательности применения структурированных по значимости правил базы знаний.

Каждую из причин, которые могут привести к наблюдаемому отклонению показателя качества уборки, обозначим V_j , а все множество таких предпосылок обозначим $S = \{V_j\}_{j=1}^n$. Для оценки актуальности каждой из причин используется экспертный анализ эмпирических данных, а также принимаются во внимание теоретические соображения. Для достижения цели, то есть устранения обнаруженного отклонения, возможно несколько вариантов реагирования. Каждый из способов реагирования будем называть допустимой стратегией и обозначать St_i , а все множество допустимых стратегий обозначим $G = \{St_i\}_{i=1}^m$. Введем понятие эффективности стратегии, понимая под ней степень успешности ликвидации обнаруженного отклонения показателя качества при применении данной стратегии. Эффективность стратегии определяется совокупным действием причины V_j , вызвавшей отклонение, и рядом других, в том числе случайных, факторов.

Эффективность применения стратегии St_i для устранения нарушения, вызванного причиной V_j , обозначим c_{ij} . Значения c_{ij} ($i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$) определяются на основе экспертных данных и образуют матрицу C размерности $m \times n$. Будем называть ее матрицей показателей эффективности. Нормируем величины элементов матрицы C в пределах от 0 до 1. Очевидно, что чем эффективнее применение стратегии St_i для устранения нарушения, вызванного причиной V_j , тем ближе значение элемента c_{ij} к единице. Рассматриваемые элементы есть исходные данные для реализации алгоритма принятия решения в условиях неопределенности².

На практике нашли применение нескольких критериев оптимальности обоснованного выбора решения [16–19].

Примем допущение, что причины V_j равновероятны. Тогда выбирается решение $St^* \in G = \{St_i\}_{i=1}^m$, обеспечивающее наибольшее ожидаемое значение эффективности [17; 20] и используется критерий Лапласа:

$$\max_i L(i) = \max_i \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m c_{ij}. \quad (1)$$

В отсутствии априорных вероятностей используют также критерий Сэвиджа, суть которого заключается в минимизации риска принятия неэффективного решения. При известной причине появления отклонения показателя качества работы V_j целесообразно использовать стратегию St_i (соответствует максимальному элементу в столбце j). Обозначим данный элемент β_j . В этом случае целесообразно использовать понятие риска r_{ij} :

$$r_{ij} = \beta_j - c_{ij}, \quad (2)$$

где β_j – максимальная эффективность при достоверном наличии V_j .

Матрица R , состоящая из элемента r_{ij} ($i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$), характеризует риски неэффективного решения. В соответствии с критерием Сэвиджа минимальная величина риска в наихудших условиях будет оптимальной стратегией:

$$\min_i S(i) = \min_i \max_j r_{ij}. \quad (3)$$

Если заранее известны значения вероятностей p_j ($j = \overline{1, m}$) появления причины отклонения V_j , используется критерий максимального математического ожидания [17; 20]:

$$\max_i M(i) = \max_i \sum_{j=1}^m c_{ij} p_j. \quad (4)$$

Данный случай возможен либо при наличии экспертных оценок значений вероятностей, либо оценок, полученных в результате обработки экспериментальных данных.

Использование рассматриваемых критериев является слабо формализуемым (в значительной степени субъективным) процессом. Его результат в большой степени обусловлен практическим опытом лица, принимающего решение. Помимо перечисленных, могут быть использованы другие синтетические критерии [21; 22], а также иные подходы к учету неопределенности [23–25].

Результаты исследования

Рассматриваемый подход реализован на примере установления способа устранения нарушений техпроцесса для внешнего признака «потери шуплого зерна с половой». Ранее нами было показано, что данный внешний признак может быть обусловлен некорректно установленными значениями следующих параметров: Par_1 – скорость движения машины; Par_2 – частота вращения вентилятора очистки; Par_3 – зазор жалюзи верхнего решета; Par_4 – зазор жалюзи

² Таха Х. А. Введение в исследование операций. М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. 912 с.

удлинителя верхнего решета³. Для ликвидации рассматриваемого нарушения в практических условиях целесообразны следующие действия: St_1 – уменьшить незначительно скорость движения комбайна; St_2 – уменьшить значительно скорость движения комбайна; St_3 – уменьшить незначительно частоту вращения вентилятора; St_4 – уменьшить значительно частоту вращения вентилятора; St_5 – уменьшить зазор жалюзи верхнего решета; St_6 – уменьшить зазор жалюзи удлинителя верхнего решета; St_7 – выполнить ремонт механизма открытия и самих жалюзи верхнего решета; St_8 – выполнить ремонт механизма открытия и самих жалюзи удлинителя верхнего решета.

Приведем лингвистическое описание внешнего признака нарушения показателей качества работы комбайна «потери щуплого зерна с половой» и одного из параметров комбайна, который связан с данным признаком – «скорость движения комбайна».

Кортеж лингвистической переменной «потери щуплого зерна с половой» имеет вид:

< Потери щуплого зерна с половой, %
{Низкие, Высокие}, [0–2 %]>.

Кортеж лингвистической переменной «скорость движения комбайна» имеет вид:

< Скорость движения комбайна, км/ч
{Низкая, Номинальная, Высокая},
[0–10 км/ч]>.

Графики функций принадлежности указанных лингвистических переменных приведены на рисунке 3.

Матрица показателей эффективности $\{C_{ij}\}$ и значения критерия Лапласа приведены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1

Table 1

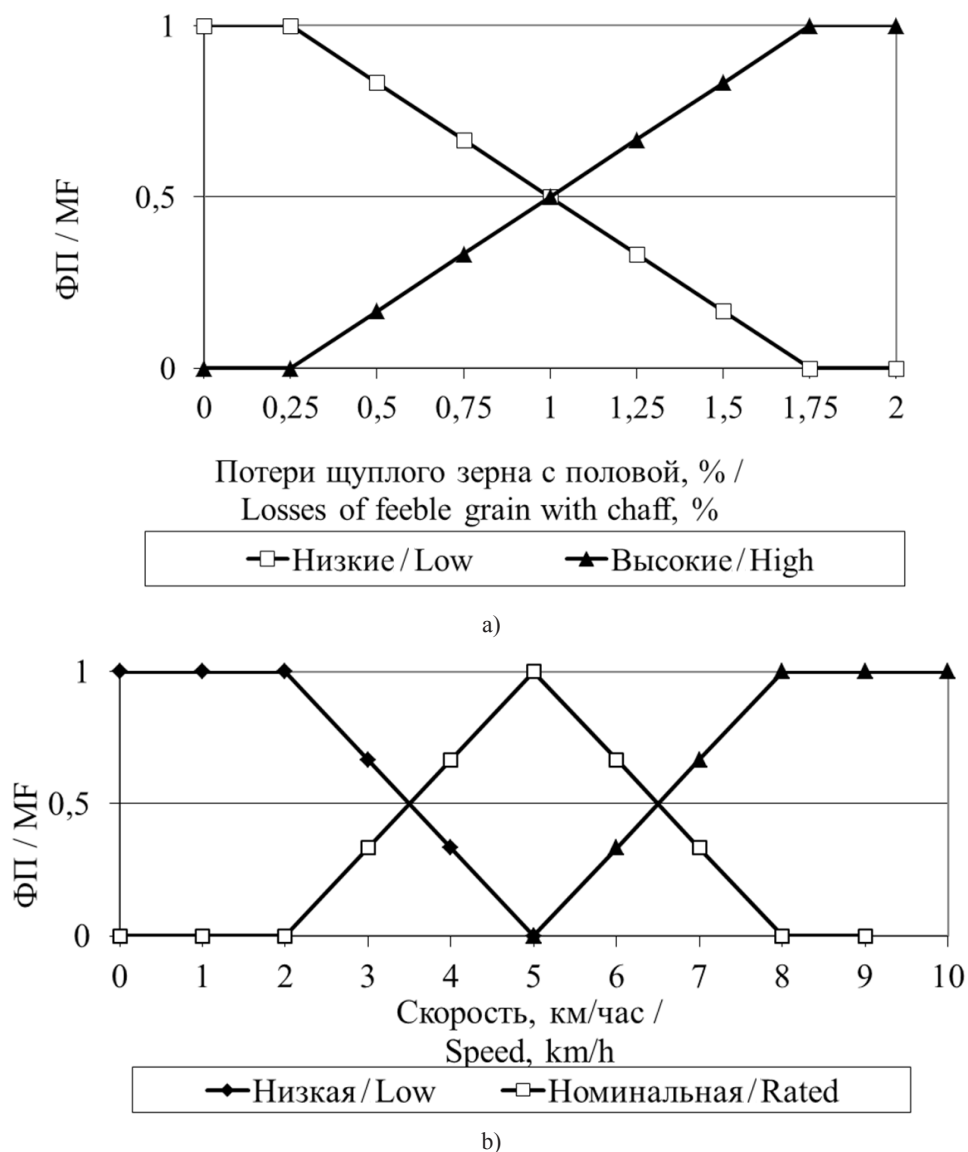
Матрица показателей эффективности
Matrix of the efficiency indices values

$St_i \backslash V_j$	V_1	V_2	V_3	V_4	$L(i)$
St_1	0,85	0,40	0,30	0,30	0,4625
St_2	0,65	0,20	0,20	0,20	0,3125
St_3	0,45	0,80	0,40	0,35	0,5000
St_4	0,30	0,70	0,25	0,20	0,3625
St_5	0,20	0,25	0,80	0,75	0,5000
St_6	0,15	0,15	0,65	0,45	0,3500
St_7	0,10	0,05	0,40	0,30	0,2125
St_8	0,10	0,05	0,10	0,50	0,1875
$\max_i c_{ij} = \beta_j$	0,85	0,80	0,80	0,75	

Предполагая, что неизвестны априорные вероятности причин V_j , положим их равными и применим критерий Лапласа (1). Вычисленные значения критерия приведены в таблице 1 в крайней правой колонке. Очевидно, что оптимальных стратегий по этому критерию две: стратегия St_3 – уменьшить незначительно частоту вращения вентилятора и стратегия St_5 – уменьшить зазор жалюзи верхнего решета. Далее иерархия выбора стратегий выстраивается в соответствии с уменьшением значения критерия и в результате имеет вид: $St_3, St_5, St_1, St_4, St_6, St_2, St_7, St_8$. При этом стратегии St_3 и St_5 равнозначны и могут быть выбраны в любой последовательности.

Для применения критерия Сэвиджа (3) получим матрицу рисков принятия неэффективного решения R . Найдем максимальные элементы в каждом столбце (они приведены в последней строке таблицы 1) и вычислим элементы матрицы рисков по формуле (2). Матрица рисков приведена в таблице 2.

³ 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.



Р и с. 3. Функции принадлежности (ФП) лингвистических переменных:
а) потери щуплого зерна с половой, %; б) скорость движения комбайна, км/час

F i g. 3. Membership functions (MF) of the linguistic variables:
а) losses of feeble grain with chaff, %; б) harvester speed, km/h

Т а б л и ц а 2
Table 2

Матрица рисков
Risks matrix

$St_i \backslash V_j$	V_1	V_2	V_3	V_4	$\max_j r_{ij}$
St_1	0,00	0,40	0,50	0,45	0,50
St_2	0,20	0,60	0,60	0,55	0,60
St_3	0,40	0,00	0,40	0,40	0,40
St_4	0,50	0,10	0,55	0,55	0,55
St_5	0,60	0,55	0,00	0,00	0,60
St_6	0,70	0,65	0,15	0,30	0,70
St_7	0,75	0,75	0,40	0,45	0,75
St_8	0,75	0,75	0,70	0,25	0,75

Минимальный элемент из максимальных (по строкам таблицы 2) дает нам наилучшую стратегию по критерию Сэвиджа: St_3 – уменьшить незначительно частоту вращения вентилятора. Иерархия выбора стратегий в случае критерия Сэвиджа имеет вид: $St_3, St_1, St_4, St_5, St_2, St_6, St_7, St_8$.

Рассмотрим теперь случай, когда известны априорные вероятности причин, вызвавших отклонение показателей качества работы комбайна, и используем критерий максимального математического ожидания (4). Распределение вероятностей представлено в таблице 3.

Следует отметить, что сумма значений вероятностей p_j не равна 1, так как эти оценки выявлены на основе экспертного анализа. Не следует упускать из виду, что вполне возможно наличие дополнительных факторов, действие которых может вызвать появление рассматриваемого внешнего признака.

Результаты расчетов $M(i)$ по формуле (4) приведены в таблице 4.

Из таблицы 4 видно, что по критерию $M(i)$ оптимальной стратегией является St_3 , то есть необходимо незначительно снизить частоту вращения вентилятора очистки. Иерархия выбора стратегий имеет вид: $St_3, St_1, St_4, St_5, St_2, St_6, St_8, St_7$.

Полученные последовательности значений критериев предназначены для использования в алгоритме корректировки в ИИС при определении последовательности операций для устранения данного нарушения, что по сути представляет собой упорядочение правил в базе знаний в соответствии с их эффективностью. Задача упорядочения правил заключается в выборе стратегии, при которой наиболее вероятно правильное заключение при условии, что в базе имеются правила с эффективностью менее 100 %.

Обсуждение и заключение

Предлагаемый подход к задаче корректировки регулируемых параметров комбайна позволяет использовать кри-

Т а б л и ц а 3
Table 3

Значения вероятностей причин
The values of reason probabilities

V_j	V_1	V_2	V_3	V_4
p_j	0,3	0,35	0,2	0,12

Т а б л и ц а 4
Table 4

Значения математического ожидания
The values of mathematical expectation

i	1	2	3	4	5	6	7	8
$M(i)$	0,491	0,329	0,537	0,409	0,3975	0,2815	0,1635	0,1875

теории принятия оптимальных решений в условиях неопределенности, используя эмпирические знания экспертов. В данном случае возникает возможность объединения различных типов информации о семантических пространствах изучаемой системы. Построение систем поддержки принятия решений в области эксплуатации уборочных машин предполагает создание базы экспертных знаний, содержащей в том числе информацию о способах реагирования на нарушения технологического процесса. Применение критериев оптимальности позволяет структурировать базу экспертных знаний в соответствии с эффективностью продукционных правил и определяет последовательность применения стратегий для целенаправленного реше-

ния задачи корректировки. Предлагаемый подход обеспечивает реализацию адекватных процедур принятия решений по корректировке технологических регулировок в полевых условиях. Немаловажным преимуществом является сокращение времени принятия решения благодаря целенаправленному использованию правил базы знаний.

Данный подход целесообразно использовать в различных ИИС с системой обратной связи, в которых возникает необходимость упорядочения базы знаний в соответствии с эффективностью эмпирических правил. Помимо этого, он будет полезен при решении таких проблем, как поиск причин неисправностей в различных технических системах и устройствах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Ерохин, С. Н.** Влияние технологических регулировок на потери зерна за молотилкой комбайна Дон-1500 / С. Н. Ерохин, А. С. Решетов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2003. – № 6. – С. 18–19.
2. **Borisova, L.** Intelligent System for Technological Adjustment of the Harvesting Machines Parameters / L. Borisova, V. Dimitrov, I. Nurutdinova. – DOI 10.1007/978-3-319-68324-9_11 // Proceedings of the 2nd International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (IITI’17). Advances in Intelligent Systems and Computing. – Cham : Springer, 2018. – Vol. 680. – Pp. 96–105. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-68324-9_11 (дата обращения: 12.02.2020).
3. **Dimitrov, V.** Intelligent Support of Grain Harvester Technological Adjustment in the Field / V. Dimitrov, L. Borisova, I. Nurutdinova. – DOI 10.1007/978-3-030-01821-4_25 // Proceedings of the 3rd International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (IITI’18). Advances in Intelligent Systems and Computing. – Cham : Springer, 2019. – Vol. 875. – Pp. 236–245. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-01821-4_25#citeas (дата обращения: 12.02.2020).
4. **Omid, M.** Design of Fuzzy Logic Control System Incorporating Human Expert Knowledge for Combine Harvester / M. Omid, M. Lashgari, H. Mobli [et al.]. – DOI 10.1016/j.eswa.2010.03.010 // Expert Systems with Applications. – 2010. – Vol. 37, issue 10. – Pp. 7080–7085. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417410001910> (дата обращения: 12.02.2020).
5. **Craessaerts, G.** Fuzzy Control of the Cleaning Process on a Combine Harvester / G. Craessaerts, J. De Baerdemaeker, B. Missotten [et al.]. – DOI 10.1016/j.biosystemseng.2009.12.012 // Biosystems Engineering. – 2010. – Vol. 106, issue 2. – Pp. 103–111. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511010000024> (дата обращения: 12.02.2020).
6. **Borisova, L.** Algorithm for Assessing Quality of Fuzzy Expert Information / L. Borisova, V. Dimitrov, I. Nurutdinova // Proceedings of 2017 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). – Novi Sad, 2017. – Pp. 1–4. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8110107/> (дата обращения: 12.02.2020).
7. **Ветров, Е. Ф.** Оптимизация технологического процесса по статистическим данным / Е. Ф. Ветров, М. Д. Генкин, Л. М. Литвин [и др.] // Машиноведение. – 1986. – № 5. – С. 48–55.

8. **Ветров, Е. В.** Оптимальное регулирование зерноуборочного комбайна (Электронный «Советчик комбайнера») / Е. В. Ветров, В. П. Чернявская, Г. Ф. Бобринева [и др.] // Труды. – 1989. – № 4. – С. 80–85.
9. **Литвин, Л. М.** Обобщенная оценка зональных показателей работы зерноуборочных комбайнов / Л. М. Литвин, Э. В. Жалкин, Е. Ф. Ветров // Техника в сельском хозяйстве. – 1989. – № 5. – С. 41–45.
10. **Царев, Ю. А.** Перспективы использования электронной системы управления в комбайнах «Дон» и «Нива» / Ю. А. Царев, А. В. Харьковский // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2005. – № 1. – С. 37–38. URL: <http://www.avtomash.ru/gur/2005/200501.htm> (дата обращения: 12.02.2020).
11. **Zadeh, L. A.** Fuzzy Sets / L. A. Zadeh. – DOI 10.1016/S0019-9958(65)90241-X // Information and Control. – 1965. – Vol. 8, issue 3. – Pp. 338–353. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001999586590241X> (дата обращения: 12.02.2020).
12. **Zadeh, L. A.** Knowledge Representation in Fuzzy Logic / L. A. Zadeh. – DOI 10.1007/978-1-4615-3640-6_1 // An Introduction to Fuzzy Logic Applications in Intelligent Systems. The Springer International Series in Engineering and Computer Science. – New York : Springer, 1992. – Vol. 165. – Pp. 1–27. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4615-3640-6_1 (дата обращения: 12.02.2020).
13. **Борисова, Л. В.** Лингвистический подход к решению задачи технологической регулировки комбайнов / Л. В. Борисова, В. П. Димитров. – DOI 10.15507/0236-2910.027.201702.178-189 // Вестник Мордовского университета. – 2017. – Т. 27, № 2. – С. 178–189. URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/ru/articles2/51-17-2/312-10-15507-0236-2910-027-201702-03> (дата обращения: 12.02.2020). – Рез. англ.
14. **Борисова, Л. В.** Подход к решению задачи по выбору значений регулируемых параметров комбайна на основе нечеткого моделирования / Л. В. Борисова, И. Н. Нурутдинова, В. П. Димитров. – DOI 10.12737/11611 // Вестник Донского государственного технического университета. – 2015. – Т. 15, № 2. – С. 100–107. URL: <https://vestnik.donstu.ru/jour/article/view/21> (дата обращения: 12.02.2020). – Рез. англ.
15. **Димитров, В. П.** Технологическая настройка сельскохозяйственных машин на основе нечеткой логики / В. П. Димитров, Л. В. Борисова, А. К. Тугенгольд [и др.]. – DOI 10.15507/0236-2910.028.201802.239-254 // Вестник Мордовского университета. – 2018. – Т. 28, № 2. – С. 239–254. URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/ru/articles2/59-18-2/406-10-15507-0236-2910-028-201802-8> (дата обращения: 12.02.2020). – Рез. англ.
16. **Лабскер, Л. Г.** О некоторой общей схеме формирования критериев оптимальности в играх с природой / Л. Г. Лабскер // Вестник финансовой академии. – 2000. – № 2. – С. 71–78. URL: <http://www.fa.ru/org/div/edition/vestnik/journals/2000%20%E2%84%962.pdf> (дата обращения: 12.02.2020).
17. **Емец, О. А.** Игры с комбинаторными ограничениями / О. А. Емец, Н. Ю. Устьян // Кибернетика и системный анализ. – 2008. – Т. 44, № 4. – С. 134–141. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/44202/11-Yemets.pdf?sequence=1> (дата обращения: 12.02.2020).
18. **Клименко, И. С.** Сравнительный анализ критериев выбора стратегий в «игре с природой» / И. С. Клименко, М. А. Плуталов, Г. А. Чеботарев // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: Модели, анализ и управление. – 2015. – Т. 9, № 1. – С. 55–59. URL: <https://clck.ru/MCMpV> (дата обращения: 12.02.2020). – Рез. англ.
19. **Клименко, И. С.** К вопросу об оценивании оптимизма критериев выбора стратегий в «Игре с природой» / И. С. Клименко, М. А. Плуталов, Г. А. Чеботарев // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: Модели, анализ и управление. – 2015. – Т. 10, № 2. – С. 19–23. URL: <https://clck.ru/MCMvW> (дата обращения: 12.02.2020). – Рез. англ.
20. **Борисова, Л. В.** О теоретико-игровом подходе к задачам технологической регулировки машин / Л. В. Борисова, В. П. Димитров, И. Н. Нурутдинова // Вестник Донского государственного технического университета. – 2013. – Т. 13, № 5–6. – С. 68–76. URL: <https://vestnik.donstu.ru/jour/article/view/418/418> (дата обращения: 12.02.2020).
21. **Горелик, В. А.** Управление риском в играх с природой на основе свертки критериев Вальда и Сэвиджа / В. А. Горелик, Т. В. Золотова // Моделирование, декомпозиция и оптимизация сложных динамических процессов. – 2008. – Т. 23, № 1. – С. 99–114.

22. Лабскер, Л. Г. Оптимизация издержек в транспортном аспекте логистической системы на основе синтетического критерия Гурвица / Л. Г. Лабскер, С. Х. Айбазова / Управление риском. – 2013. – № 2 (66). – С. 52–72. URL: http://ankil.info/WordPress/wp-content/uploads/2015/04/UP_2013_2-с-обложкой.pdf (дата обращения: 12.02.2020). – Рез. англ.

23. Малышев, В. В. Метод принятия решений в условиях многообразия способов учета неопределенности / В. В. Малышев, Б. С. Пиявский, С. А. Пиявский // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2010. – № 1. – С. 46–61.

24. Orlovsky, S. A. Decision-Making with a Fuzzy Preference Relation / S. A. Orlovsky. – DOI 10.1016/0165-0114(78)90001-5 // Fuzzy Sets and Systems. – 1978. – Vol. 1, issue 3. – Pp. 155–167. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0165011478900015> (дата обращения: 12.02.2020).

25. Sengupta, K. Fuzzy Preference and Orlovsky Choice Procedure / K. Sengupta. – DOI 10.1016/S0165-0114(96)00079-6 // Fuzzy Sets and System. – 1998. – Vol. 93, issue 2. – Pp. 231–234. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165011496000796?via%3Dihub>

Поступила 20.08.2019; принята к публикации 13.11.2019; опубликована онлайн 31.02.2020

Об авторах:

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

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

Димитров Валерий Петрович, заведующий кафедрой управления качеством ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), доктор технических наук, профессор, Researcher ID: E-4908-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1439-1674>, Scopus ID: 57195505958, kaf-qm@donstu.ru

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

Заявленный вклад соавторов:

Л. В. Борисова – исследование взаимосвязей «регулируемые параметры – показатели качества работы комбайна»; И. Н. Нурутдинова – разработка механизма применения критериев «игр с природой» к задаче корректировки регулируемых параметров, получение результатов иллюстративного примера; В. П. Димитров – анализ предметной области, моделирование нечетких экспертных знаний; А. К. Тугенгольд – разработка базы экспертных знаний.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Yerokhin S.N., Reshetov A.S. Effect of Technological Adjustments on Grain Losses behind the Thresher of Don-1500 Harvester. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva* = Mechanization and Electrification of Agriculture. 2003; (6):18-19. (In Russ.)

2. Borisova L., Dimitrov V., Nurutdinova I. Intelligent System for Technological Adjustment of the Harvesting Machines Parameters. In: Proceedings of the 2nd International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (IITI'17). Advances in Intelligent Systems and Computing. Cham: Springer; 2018. 680:96-105. (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-68324-9_11
3. Dimitrov V., Borisova L., Nurutdinova I. Intelligent Support of Grain Harvester Technological Adjustment in the Field. Proceedings of the 3rd International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (IITI'18). Advances in Intelligent Systems and Computing. Cham: Springer; 2019. 875:236-245. (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-01821-4_25
4. 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. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.03.010>
5. Craessaerts G., De Baerdemaeker J., Missotten B., et al. Fuzzy Control of the Cleaning Process on a Combine Harvester. *Biosystems Engineering*. 2010; 106(2):103-111. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.12.012>
6. Borisova L., Dimitrov V., Nurutdinova I. Algorithm for Assessing Quality of Fuzzy Expert Information. In: Proceedings of 2017 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). Novi Sad; 2017. Pp. 1-4. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8110107/> (accessed 12.02.2020). (In Eng.)
7. Vetrov Ye.F., Genkin M.D., Litvin L.M., et al. Optimization of Technological Process on Statistical Data. *Mashinovedenie* = Mechanical Science. 1986; (5):48-55. (In Russ.)
8. Vetrov Ye.V., Chernyavskaya V.P., Bobrineva G.F., et al. Optimum Control of the Combine Harvester (Electronic "Combine Adviser"). *Trudy* = Proceedings. 1989; (4):80-85. (In Russ.)
9. Litvin L.M., Zhalkin E.V., Vetrov Ye.F. Generalized Assessment of Zone Performance of Combine Harvesters. *Technika v sel'skom hozyaystve* = Machinery in Agriculture. 1989; (5):41-45. (In Russ.)
10. Tsarev Yu.A., Kharkovskiy A.V. Prospects for Using the Electronic Control System in Don and Niva Harvesters. *Traktory i sel'skohozyaystvennyye mashiny* = Tractors and Agricultural Machines. 2005; (1):37-38. Available at: <http://www.avtomash.ru/gur/2005/200501.htm> (accessed 12.02.2020). (In Russ.)
11. Zadeh L.A. Fuzzy Sets. *Information and Control*. 1965; 8(3):338-353. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
12. 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. New York: Springer; 1992. 165:1-27. (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3640-6_1
13. 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; 2(27):178-189. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.027.201702.178-189>
14. Borisova L.V., Nurutdinova I.N., Dimitrov V.P. Approach to the Problem of Choice of the Adjustable Harvester Parameter Values Based on Fuzzy Modeling. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Vestnik of Don State Technical University. 2015; 15(2):100-107. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.12737/11611>
15. Dimitrov V.P., Borisova L.V., Tugengold A.K., et al. Technological Adjustment of Agricultural Machines Based on Fuzzy Logic. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(2):239-254. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.239-254>
16. Labsker L.G. A General Pattern of Forming Optimum Criteria in Games with Nature. *Vestnik finansovoy akademii* = Vestnik of the Finance Academy. 2000; (2):71-78. Available at: <http://www.fa.ru/org/div/editon/vestnik/journals/2000%20%E2%84%962.pdf> (accessed 12.02.2020). (In Russ.)
17. Yemets O.A., Ustyan N.Yu. Games with Combinatorial Restrictions. *Kibernetika i sistemnyy analiz* = Cybernetics and Systems Analysis. 2008; 44(4):134-141. Available at: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/44202/11-Yemets.pdf?sequence=1> (accessed 12.02.2020). (In Russ.)
18. Klimenko I.S., Plutalov M.A., Chebotarev G.A. Comparative Analysis of Criteria for Selection Strategies in the "Game with Nature". *Vestnik Rossiyskogo novogo universiteta. Seriya: Slozhnye sistemy: Modeli, analiz i upravlenie* = Vestnik of Russian New University. Series: Complex Systems: Models, Analysis, Management. 2015; 9(1):55-59. Available at: <https://clck.ru/MCMpV> (accessed 12.02.2020). (In Russ.)

19. Klimenko I.S., Plutalov M.A., Chebotarev G.A. To the Evaluation of Optimism Criteria for Selection of Strategies in the “Game with Nature”. 2015; 10(2):19-23. Available at: <https://clck.ru/MCMvw> (accessed 12.02.2020). (In Russ.)
20. Borisova L.V., Nurutdinova I.N., Dimitrov V.P. On Game-Theory Approach to Process Machine Adjustment Problems. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Vestnik of Don State Technical University. 2013; 13(5-6):68-76. Available at: <https://vestnik.donstu.ru/jour/article/view/418/418> (accessed: 12.02.2020). (In Russ.)
21. Gorelik V.A., Zolotova T.V. Risk Management in Games with Nature Based on Wald and Savage Crunch Criteria. *Modelirovanie, dekompozitsiya i optimizatsiya slozhnykh dinamicheskikh protsessov* = Modeling, Decomposition and Optimization of Complex Dynamic Processes. 2008; 23(1):99-114. (In Russ.)
22. Labsker L.G., Aybazonova S.Kh. Optimization of Costs in the Transport Aspect of the Logistics System Based on the Synthetic Hurwitz Criterion. *Upravlenie riskom* = Risk Management. 2013; (2):52-72. Available at: http://ankil.info/WordPress/wp-content/uploads/2015/04/YP_2013_2-c-обложкой.pdf (accessed 12.02.2020). (In Russ.)
23. Malyshev V.V., Piyavskiy B.S., Piyavskiy S.A. The Method of Decision-Making in a Variety of Ways of Taking into Account Uncertainty. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya* = Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Theory and Control Systems. 2010; (1):46-61. (In Russ.)
24. Orlovsky S.A. Decision-Making with a Fuzzy Preference Relation. *Fuzzy Sets and Systems*. 1978; 1(3):155-167. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(78\)90001-5](https://doi.org/10.1016/0165-0114(78)90001-5)
25. Sengupta K. Fuzzy Preference and Orlovsky Choice Procedure. *Fuzzy Sets and System*. 1998; 93(2):231-234. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(96\)00079-6](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(96)00079-6)

Received 20.08.2019; revised 13.11.2019; published online 31.03.2020

About the authors:

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

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

Valeriy P. Dimitrov, Head of the Chair of Quality Management, Don State Technical University (1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don 344000, Russia) D.Sc. (Engineering), Professor, Researcher ID: E-4908-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1439-1674>, Scopus ID: 57195505958, kaf-qm@donstu.ru

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

Contribution of the authors:

L. V. Borisova – research of interrelations “adjustable parameters – harvesting quality indices”; I. N. Nurutdinova – development of a mechanism for applying the “games with nature” criteria to the problem of updating adjustable parameters of a grain harvester, obtaining the results of example; V. P. Dimitrov – analysis of subject domain, modeling of fuzzy expert knowledge; A. K. Tugengold – development of the knowledge base.

All authors have read and approved the final manuscript.