

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ / TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT



<https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.327-343>

EDN: <https://elibrary.ru/rvcuqr>

УДК / UDK 631.354.2:004

Оригинальная статья / Original article

Структура информационной системы для решения задачи настройки комбайнов

**В. П. Димитров, И. Н. Нурутдинова[✉],
Л. В. Борисова, А. Т. Черняев**

*Донской государственный технический университет,
г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация,
<https://ror.org/00x5je630>*

[✉] nurut.inna@yandex.ru

Аннотация

Введение. Использование ресурсных возможностей, заложенных в конструкцию современных зернокомбайнов, сдерживается влиянием человеческого фактора, в частности, значительной информационной нагрузкой на оператора. Поэтому для повышения эффективности уборочных работ и автоматизации процесса настройки сельскохозяйственной техники актуальным является разработка информационной системы настройки комбайнов.

Цель исследования. Развитие подхода к решению задачи по оптимальной настройке регулируемых параметров рабочих органов комбайна, основанного на внедрении интеллектуальных информационных систем.

Материалы и методы. Объектом исследования выступает программная система поддержки принятия решений для предварительной настройки регулируемых параметров зерноуборочного комбайна. Применены методы системного анализа, экспертного оценивания, нечеткого моделирования и проектирования реляционной базы данных. В качестве программно-аппаратной основы использованы клиент-серверная архитектура и встраиваемая система управления базами данных SQLite.

Результаты исследования. Предложена иерархическая структура задачи предварительной настройки рабочих органов сельскохозяйственной машины, состоящая из слоев и элементов. На ее основе реализована архитектура программной системы. Система может функционировать в двух режимах: эксперта и пользователя. База знаний экспертной системы по настройке базируется на удаленной реляционной системе управления базами данных с возможностью сохранения всех данных локально для работы эксперта и актуальных данных, выбранных экспертами, для работы пользователя. Собрана и проанализирована экспертная информация, на основе которой создана база экспертных знаний. Рассмотрены комбинации значений внешних факторов, для которых приведен вывод конкретных значений регулируемых параметров.

© Димитров В. П., Нурутдинова И. Н., Борисова Л. В., Черняев А. Т., 2026



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. Разработанная информационная система позволяет формализовать процесс предварительной настройки регулируемых параметров комбайна и снизить зависимость принятия решений от субъективного опыта оператора. Практическая значимость работы состоит в возможности использования системы для поддержки эксперта и пользователя при выборе начальных значений параметров в изменяющихся условиях уборки. Перспективы исследования связаны с расширением базы знаний, учетом большего числа факторов и развитием механизмов автоматической корректировки настроек в реальном времени.

Ключевые слова: зерноуборочный комбайн, предварительная настройка, производственные правила, экспертная база знаний, иерархическая структура задач, клиент-серверная архитектура

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Димитров В.П., Нурутдинова И.Н., Борисова Л.В., Черняев А.Т. Структура информационной системы для решения задачи настройки комбайнов. *Инженерные технологии и системы*. 2026;36(2):327–343. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.327-343>

Structure of the Information System for Solving the Problem of Adjusting Harvesters

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

L. V. Borisova, A. T. Chernyaev

Don State Technical University,

Rostov-on-Don, Russian Federation, <https://ror.org/00x5je630>

 nurut.inna@yandex.ru

Abstract

Introduction. The use of the capabilities of the design of modern grain harvesters is limited by the human factor, in particular, by the significant information load on the operator. To increase the efficiency of harvesting operations and automate the process of adjusting agricultural machinery, it is relevant to develop an information system for adjusting harvesters. **Aim of the Study.** The study is aimed at developing an approach to solving the problem of optimal adjustment of adjustable parameters of the combine harvester working bodies through using the introduction of intelligent information systems.

Materials and Methods. The study subject is a decision support software system for preliminary adjustment of grain harvester adjustable parameters. To solve the problem, there were used the methods of system analysis, expert assessment, fuzzy simulation, and relational database design. Client-server architecture and an embedded Database Management System SQLite were used as the hardware and software basis.

Results. There has been proposed a hierarchical structure for the task of preliminary adjusting of agricultural machinery working bodies. This structure consists of layers and elements and is the basis for the software system architecture. The system can operate in two modes: an expert mode and user mode. The expert system knowledge base for adjustment is based on a remote relational Database Management System with the ability to store all data locally for expert work and relevant data selected by experts for user work. There has been collected and analyzed expert information, which is used to create an expert knowledge base. There have been considered various combinations of external factor values, for which a conclusion about specific values for adjustable parameters has been derived.

Discussion and Conclusion. The developed information system allows formalizing the preliminary adjustment process for the harvester adjustable parameters and reducing the dependence of decision-making on the operator subjective experience. The practical importance of the study is in the ability to use the system to support experts and users when selecting initial parameter values in changing conditions of harvesting. Future studies are relevant, because of the necessity of expanding the knowledge base in the area under studying, taking into account a greater number of factors, and developing mechanisms for automatic adjustment of parameters in real time.

Keywords: grain harvester, preliminary adjustment, production rules, expert knowledge base, hierarchical task structure, client-server architecture

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Dimitrov V.P., Nurutdinova I.N., Borisova L.V., Chernyaev A.T. Structure of the Information System for Solving the Problem of Adjusting Harvesters. *Engineering Technologies and Systems*. 2026;36(2):327–343. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.327-343>

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение продовольственной безопасности является одной из центральных задач сельского хозяйства. Важное место в ее решении занимает уборка урожая. В первую очередь это касается уборки зерновых и зернобобовых культур. Снижение потерь и повышение качества выполняемых работ достигается за счет непрерывного конструктивного совершенствования зерноуборочных комбайнов¹.

В последние годы широкое применение получили высокопроизводительные комбайны, к которым относятся агрегаты с аксиально-роторным молотильно-сепарирующим устройством, отличающиеся высокой пропускной способностью, меньшим процентом дробления зерна и возможностью работы на более засоренных полях [1–3]. Несмотря на непрерывное совершенствование таких устройств и других агрегатов [2; 4; 5], для полноценного использования конструктивных возможностей техники требуется оптимальная настройка регулируемых параметров комбайна, работающего в различных внешних условиях [3; 6; 7]. Это обусловлено неоднозначностью и нечеткостью информации о внешних факторах, показателях качества уборки, технических характеристиках состояния машины, а также сложными взаимосвязями между этими группами факторов и их изменениями во времени. Установленные на основе экспертных знаний и эмпирических исследований зависимости между указанными факторами образуют огромный массив информации, для использования которой с целью выбора значений регулируемых параметров комбайна требуется создание интеллектуальной информационной системы (ИИС).

Целью исследования является разработка структуры, программных блоков, базы экспертных знаний интеллектуальной информационной системы для обеспечения операторов актуальными данными, необходимыми для оптимальной предварительной настройки регулируемых параметров зернокомбайнов.

Реализация поставленной цели включает следующие задачи: разработка иерархической структуры задач настройки комбайна с учетом иерархии объектов

¹ Липовский М.И., Перекопский А.Н. Зерноуборочный комбайн: из прошлого – к новому поколению. СПб.: ИАЭП; 2015. 313 с.

предметной области; проектирование реляционной базы данных для хранения экспертных знаний в виде продукционных правил; реализация клиент-серверной архитектуры с локальными встраиваемыми базами данных для автономной работы; создание пользовательских интерфейсов для эксперта и оператора комбайна; формирование базы экспертных знаний.

Результаты исследования составляют основу ИИС для помощи оператору в принятии решений по выбору значений регулируемых параметров комбайна. На данный момент разработаны и апробированы самостоятельные блоки ИИС, на которые получены свидетельства о государственной регистрации².

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Различные аспекты проблемы оптимальной настройки рабочих органов зерноуборочного комбайна исследуются на протяжении последних десятилетий. В научной литературе широко представлены подходы к выбору режимов работы и установке таких регулируемых параметров, как частота вращения ротора и вентилятора очистки при уборке различных культур. Большинство существующих решений базируется на моделях, построенных на основе эмпирических данных и экспертных оценок [6–8].

Зарубежные исследователи проанализировали эмпирические зависимости расхода топлива и параметров настройки комбайна в условиях различной влажности и урожайности [9], что наглядно иллюстрирует значительное влияние даже небольших изменений внешних условий на показатели качества уборки. В частности, были описаны основные этапы технологической настройки рабочих органов на примере комбайна роторного типа [10; 11]. В то же время погрешности в настройке параметров приводят к потерям зерна, снижению производительности, повышенному расходу топлива [12], что фактически занижает конструктивные возможности комбайна.

Анализируя современные тенденции в исследуемой области, можно отметить, что с развитием концепции интеллектуального земледелия все большее внимание уделяется автоматизации процесса управления сельскохозяйственной техникой [13]. Концептуальные принципы создания интеллектуальных машин предполагают обязательное внедрение систем поддержки принятия решений. Исследователи из Китая успешно применяют методы нечеткой логики для контроля скорости движения комбайна, очистки и стабилизации нагрузки [14–16]. Интеллектуальные системы технологической настройки на базе нечеткого моделирования продемонстрировали свою эффективность при определении начальных параметров жатвенной части [6].

Несмотря на достигнутые успехи в области математического и нечеткого моделирования, комплексный подход к созданию единой информационной си-

² Папченко А.А., Борисова Л.В., Димитров В.П., Хубиян К.Л., Черняев А.Т. Соответствие значений регулируемых параметров рабочих органов зерноуборочных комбайнов факторам внешней среды: свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025622075 Российская Федерация. № 2025621650; заявл. 26.04.25; зарег. 16.05.25. <https://elibrary.ru/igszej>; Папченко А.А., Борисова Л.В., Димитров В.П., Хубиян К.Л., Черняев А.Т. Программа составления таблиц соответствия комбинации входных и выходных значений: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2025616246 Российская Федерация. № 2025614858; заявл. 11.03.25; зарег. 13.03.2025. <https://www.elibrary.ru/dwqdddy>

стемы, способной аккумулировать экспертные знания и оперативно выдавать рекомендации по предварительной настройке параметров комбайнов в полевых условиях, остается недостаточно изученным. До сих пор неизвестно, как оптимально структурировать базы данных и организовать программно-аппаратную архитектуру для автономного функционирования подобных систем на мобильных и встраиваемых устройствах с сохранением сложной иерархии связей между входными (неконтролируемыми факторами среды) и выходными (регулируемыми настройками) параметрами. Существующие программные решения либо требуют постоянного подключения к облачным серверам, либо не предоставляют удобного механизма совместной работы экспертов над формированием и объединением баз продукционных правил.

Следовательно, существует острая необходимость в разработке гибкой архитектуры с использованием легковесных баз данных, которая позволит формализовать, систематизировать и автономно использовать экспертные знания. Направленность данного исследования заключается в обосновании и проектировании структуры информационно-программной системы для решения задачи оперативной предварительной настройки роторных зерноуборочных комбайнов, способной функционировать на клиентских устройствах без постоянного доступа к сети и поддерживать систему распределенных экспертных правок.

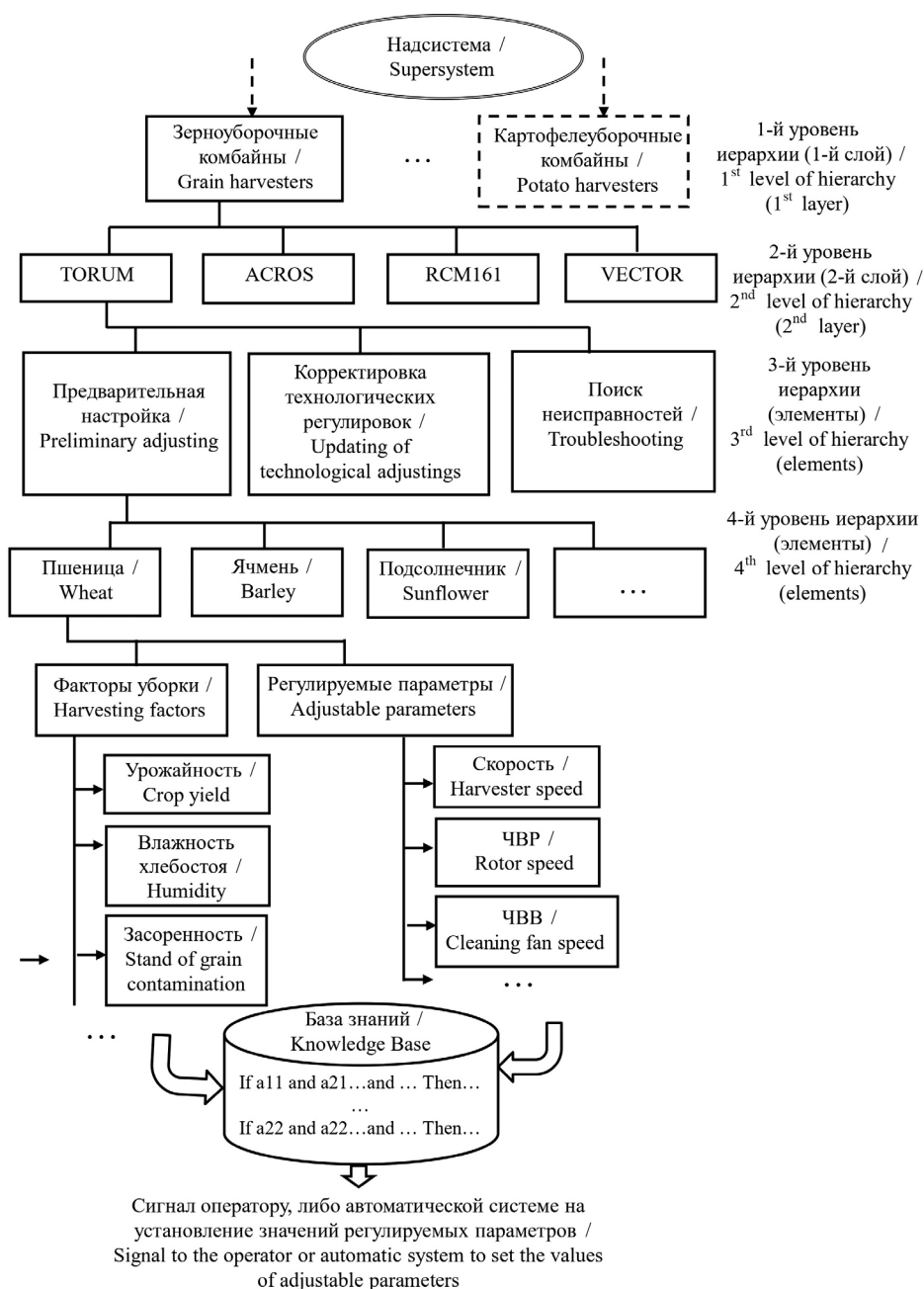
МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования

Объектом исследования является автономная информационная программная система поддержки принятия решений, предназначенная для оперативной предварительной настройки регулируемых параметров рабочих органов зерноуборочного комбайна (в частности, роторного типа, на примере комбайна TORUM) непосредственно в процессе работы. В качестве обобщенной схемы описания данной задачи, актуальной для большинства мобильных сельскохозяйственных уборочных машин, выступает иерархическая структура объектов предметных областей (рис. 1). Данная структура представляет собой древовидный граф, где слой – это узел дерева, который может иметь в потомках другие узлы или листья, а элементы – это листья древовидного графа. Аналогично файловой системе, слои рассматриваются как каталоги, а элементы – как файлы. В данном случае предусмотрено использование нескольких слоев (1 уровень иерархии). Это могут быть уборочные машины, предназначенные для уборки различных культур (зерновые, зернобобовые, картофель и др.). Второй слой рассматривает различные типы зерноуборочных машин (TORUM, ACROS, RSM161 и др.).

Методы, оборудование и процедура исследования

На основе ранее разработанного подхода [17; 18], базирующегося на методах нечеткого моделирования экспертных знаний и лингвистическом подходе, для создания информационной системы применялись методы системного анализа, экспертного оценивания и проектирования реляционных баз данных.



Р и с. 1. Иерархия слоев и элементов системы
F i g. 1. Hierarchy of layers and elements of the system

Источник: рисунки 1–3 составлены авторами статьи в программе Microsoft PowerPoint.
Source: figures 1–3 were compiled by the authors of the article in the program Microsoft PowerPoint.

Для каждого зерноуборочного комбайна характерны типовые задачи, решаемые в практических (полевых) условиях: предварительная настройка машины, корректировка технологических регулировок, поиск неисправностей и др. Следующим уровнем иерархии является наличие элементов для каждого блока предыдущей ступени. В частности, множество культур, для уборки которых используется данная сельскохозяйственная машина. Для каждой культуры характерны собственные элементы, составляющие множества факторов уборки и регулируемых параметров машины. Среди факторов уборки – урожайность, влажность хлебной массы, а среди регулируемых параметров – частота вращения ротора, частота вращения вентилятора очистки и др. (рис. 1).

На основе экспертной информации формируется база знаний экспертной системы, основанная на продукционной модели представления знаний. На основе механизма вывода решений формируются сигналы оператору на установление конкретных значений регулируемых параметров.

Таким образом, целью создания информационной системы для настройки сельскохозяйственных машин является программная реализация рассмотренной иерархической структуры задач технологической регулировки, а также инструментария для создания таких баз знаний экспертами и предоставления данных конечным пользователям.

Формализованные зависимости между входными и выходными параметрами системы представляют собой множество правил, отображающих набор высказываний $A_1, A_2, \dots, A_n$ о состоянии входных факторов в высказывание B о выходном параметре. Правила носят эмпирический характер и имеют вид: «Если A_1 и A_2 и ... и A_n , то B ».

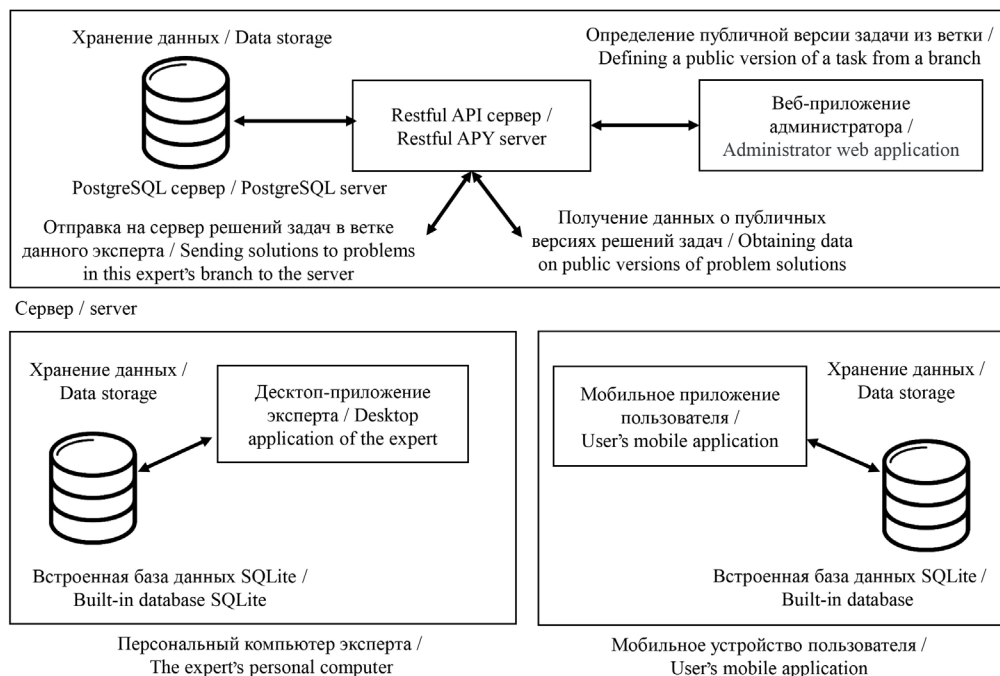
В результате структурной идентификации получается схема решения задачи [18]. При этом данная схема соответствует прямой задаче, которая состоит в определении оптимальных значений регулируемых параметров в зависимости от значений факторов уборки, т. е. входными переменными являются факторы уборки, а выходными – регулируемые параметры комбайна. Отметим, что для второй, обратной, задачи необходимо структурировать взаимосвязи между регулируемыми параметрами и показателями качества работы комбайна, когда входными переменными являются регулируемые параметры, а выходными – показатели качества работы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В процессе наполнения базы знаний информационной системы эксперт должен проанализировать все вероятные сочетания лингвистических оценок, характеризующих входные факторы, и поставить каждой такой комбинации в соответствие наиболее рациональное значение регулируемого параметра комбайна [18].

В целях практической реализации данного подхода была спроектирована распределенная архитектура программного комплекса (рис. 2). Базовым узлом выступает удаленный сервер с поддержкой Restful API для управления централизованной базой данных, а также веб-модуль администратора, служащий для выбора и публикации утвержденных версий задач. Работа специалистов

организована через профильное десктопное приложение, функционал которого включает как непосредственное формирование экспертных решений, так и автоматическое создание локальных резервных копий серверной базы во встраиваемую систему управления базами данных. Для конечного потребителя предусмотрено мобильное приложение: оно обеспечивает ввод фактических значений факторов среды с последующей выдачей рекомендованных настроек из публичной базы, при этом кэшируя утвержденные версии задач в памяти мобильного устройства для обеспечения автономной работы в полевых условиях.



Р и с. 2. Структурная схема программной системы

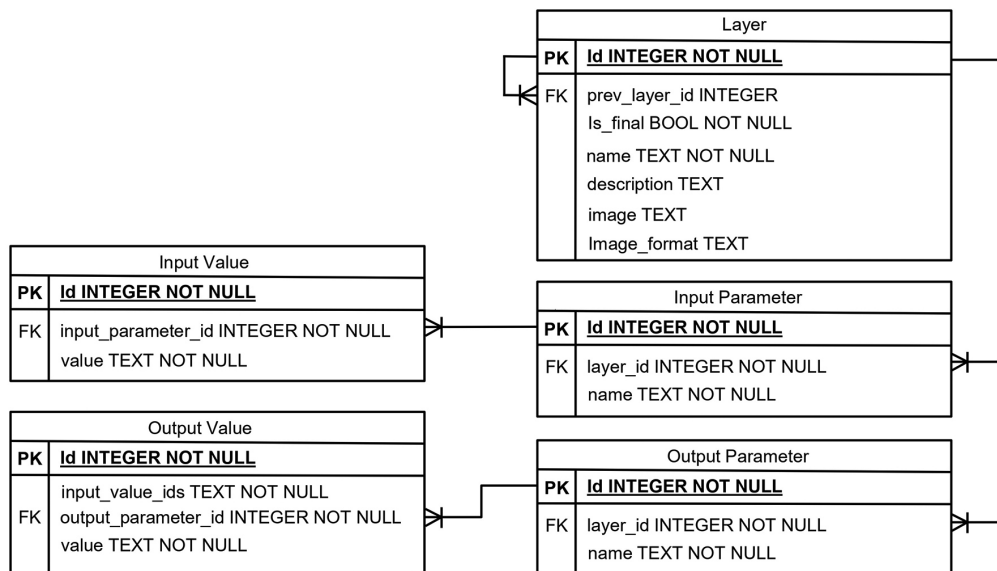
F i g. 2. Structural schema of the software system

Оптимизация процесса создания и эксплуатации базы знаний требует реализации механизма автоматического формирования комбинаций входных параметров³. В рамках настоящего исследования эта проблема решена через проектирование реляционной базы данных Entity Relationship (ER-модель представлена на рисунке 3), адаптированной для интеграции в специализированное программное обеспечение. Такая архитектура позволяет экспертам систематически формировать данные согласно установленным принципам.

В пользовательском интерфейсе информация представлена в виде электронной таблицы, где входные параметры расположены в заголовках столбцов, а строки

³ Папченко А.А., Борисова Л.В., Димитров В.П., Хубиян К.Л., Черняев А.Т. Программа составления таблиц соответствия комбинации входных и выходных значений.

содержат все возможные комбинации входных значений, сгенерированные методом полного перебора. Такое представление данных напрямую соответствует внутренней структуре базы, что обеспечивает высокую эффективность операций чтения и записи.



Р и с. 3. Схема базы данных без учета таблиц, необходимых для авторизации и системы правок

F i g. 3. Database schema excluding the tables required for authorization and editing system

Формальное описание пользовательского представления выглядит так:

Входные параметры: $IP = \{ip_1, ip_2, \dots, ip_m\}$.

Выходные параметры: $OP = \{op_1, op_2, \dots, op_n\}$.

Входные значения: $IV = \{iv_{1,1}, iv_{1,2}, \dots, iv_{1,k1}, iv_{2,1}, iv_{2,2}, \dots, iv_{2,k2}, \dots, iv_{m,1}, iv_{m,2}, \dots, iv_{m,km}\}$, где $iv_{i,j}$ – j -е значение входного параметра ip_i .

Выходные значения: $OV = \{ov_{1,1}, ov_{1,2}, \dots, ov_{1,p1}, ov_{2,1}, ov_{2,2}, \dots, ov_{2,p2}, \dots, ov_{n,1}, ov_{n,2}, \dots, ov_{n,pn}\}$, где $ov_{i,j}$ – значение, связанное с выходным параметром op_i , а j обозначает комбинацию входных значений, соответствующую этому выходному значению.

C – множество всех возможных комбинаций входных значений, где каждая комбинация содержит ровно по одному значению от каждого входного параметра: $C = \{\{iv_{1,a1}, iv_{2,a2}, \dots, iv_{m,am}\} | a_i \in \{1, 2, \dots, k_i\}, \forall i \in \{1, 2, \dots, m\}\}$.

Каждая комбинация $c \in C$ имеет вид: $c = (iv_{1,a1}, iv_{2,a2}, \dots, iv_{m,am})$, где a_i – индекс выбранного значения для параметра ip_i .

Для любого $c \in C$ существует $ov_{i,j} \in OV$ такое, что $f(c) = ov_{i,j}$, где i соответствует выбранному выходному параметру, а j однозначно определяется индексами входных значений в комбинации c : $\forall op_i \in OP, \forall c \in C, \exists ov_{i,j} \in OV : F(op_i, c) = ov_{i,j}$.

Поскольку над задачей может работать сразу несколько экспертов, необходимо обеспечить удобство их взаимодействия в виде системы правок. Например, при решении задачи моделирования предметной области «Зерноуборочные комбайны» для модели зерноуборочного комбайна «TORUM» и при решении задачи «Предварительной настройки» во время уборки пшеницы один эксперт может увеличить количество рабочих органов зерноуборочного комбайна (выходных параметров), для которых в результате исследования обнаружил наиболее эффективные значения их параметров. Второй эксперт для этой же задачи исследовал некоторые новые параметры среды (входные параметры) и на пересечении всевозможных комбинаций их значений и параметров рабочих органов комбайнов представил соответствующие оптимальные значения уже существовавших в его версии задачи параметров рабочих органов комбайна. В этом случае множества регулируемых параметров отличаются (причем значительно). Для организации подобной работы применили метод контроля версий для набора правил в экспертных системах. Сама концепция системы контроля версий не нова, и наиболее известная ее реализация в сфере разработки программного обеспечения – система Git [19; 20].

Эксперты могут вести параллельно свои версии задачи – ветки, а затем их объединять. Пользователю предоставляется только публичная версия результатов решения задачи, которую определяет администратор системы (уполномоченный экспертом).

При запуске приложения эксперта происходит инициализация встроенной базы данных: для увеличения независимости от подключения к сети Интернет во время непосредственной работы над задачей на устройстве эксперта создается файл встраиваемой базы данных SQLite (при первом входе в программу или в случае потери этого файла), схема которой без учета таблиц, необходимых для работы системы контроля версий, представлена на рисунке 2. Также при инициализации проверяется корректность ее схемы. В случае обнаружения ошибок в схеме базы данных или при невозможности подключиться, приложение создает новый файл с корректной схемой.

После успешной авторизации эксперта приложение обращается к серверу и проверяет (в случае, если было соединение с сетью Интернет), нет ли новых правок в ветках, а также не появились ли в целом новые каталоги задач и задачи. Происходит синхронизация встроенной базы данных на устройстве эксперта с удаленной на сервере. Авторизованному эксперту предоставляется возможность работы с задачами и их директориями. После окончания работы над задачей эксперт может опубликовать свое решение новой добавленной им задачи или правки уже существующей, что сохранит ее также на удаленном сервере и позволит прочим экспертам с ней работать. В таблице приведен пример ввода экспертом взаимосвязей.

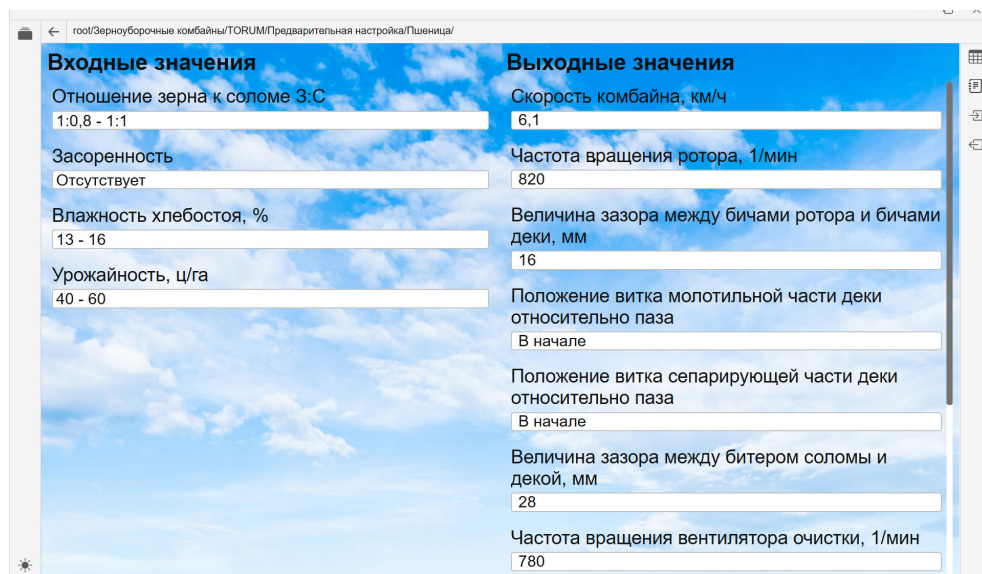
Клиентская часть веб-приложения обладает минимальным функционалом и служит для выбора уполномоченным экспертом актуальной версии (правки) задачи. Именно эту публичную версию задачи и будет скачивать приложение пользователя, остальные правки будут недоступны для его приложения.

Пример ввода экспертом взаимосвязей
Example of expert input of relationships

Входы / Inputs				Выходы / Outputs		
Урожайность, ц/га / Crop yield, hkg/ha	Влажность, % / Humidity, %	...	Засоренность поля, % / Field contamination, %	Скорость, км/час / Speed, km/h	...	Частота вращения ротора, мин ⁻¹ / Rotor speed, min ⁻¹
40	14		отсутствует / absent	7,3		800
40	17		средняя / average	6,4		870
...	...		...	...	...	...
40	12		большая / big	5,2		830

Пользовательское приложение при открытии проводит процедуру инициализации базы данных, аналогичную таковой у приложения эксперта. Пользователю не нужно знать о ветках и наличии различных версий одной задачи, поэтому в дальнейшем при получении актуальных версий каталогов задач с самими задачами те сущности, в которых есть расхождение между локальными данными на встроенной базе данных и на удаленном сервере, переписываются на актуальную версию.

Далее пользователь выбирает интересующую его задачу из каталогов задач и попадает на экран работы с ней. Здесь он выбирает значения каждого из входных параметров и на выходе получает соответствующие выходные значения (рис. 4)



Входные значения	Выходные значения
Отношение зерна к соломе З:С 1:0,8 - 1:1	Скорость комбайна, км/ч 6,1
Засоренность Отсутствует	Частота вращения ротора, 1/мин 820
Влажность хлебостоя, % 13 - 16	Величина зазора между бичами ротора и бичами деки, мм 16
Урожайность, ц/га 40 - 60	Положение витка молотильной части деки относительно паза В начале
	Положение витка сепарирующей части деки относительно паза В начале
	Величина зазора между битером соломы и декой, мм 28
	Частота вращения вентилятора очистки, 1/мин 780

Р и с. 4. Вид экрана пользователя

F i g. 4. User screen view

Источник: скриншот экрана программы сделан авторами статьи.

Source: screenshot of the program screen was taken by the authors of the article.

В результате проведенного исследования разработана программная система, реализующая подход к решению задачи выбора эффективных начальных значений регулируемых параметров комбайна в зависимости от внешних условий уборки (для конкретной убираемой культуры). Рассмотрено применение основных положений создания современных программных систем. Произведена структуризация системы и формальное описание зависимостей значений параметров машины от значений внешних факторов. Создана база знаний, на которой основывается вывод рекомендуемых начальных значений регулируемых параметров рабочих органов комбайна. На модельном примере представлены результаты работы программной системы.

ОБСУЖДЕНИЕ

Ключевой особенностью разработанной базы данных является поддержка иерархической организации решаемых задач с последующим вычислением выходных значений. Принцип организации данных аналогичен структуре файловой системы: записи таблицы Layer со значением false в поле is_final выполняют роль директорий, тогда как записи с is_final=true аналогичны файлам.

При проектировании реляционной базы данных был выявлен парадоксальный случай, когда строгое следование принципам нормализации привело к ухудшению эксплуатационных характеристик системы. Центральной проблемой стало поле input_value_ids в таблице Output Value, которое хранит идентификаторы связанных записей из таблицы Input Value в виде текстовой строки с разделителями. Такая реализация сознательно нарушает требование атомарности данных, предъявляемое первой нормальной формой, но обеспечивает значительные практические преимущества.

Альтернативный нормализованный подход потребовал бы создания промежуточной таблицы для реализации связи «многие-ко-многим» между таблицами Input Value и Output Value. Однако такое решение привело бы к экспоненциальному росту объема хранимых данных. Каждой записи в Output Value соответствовало бы множество записей в промежуточной таблице – по одной для каждого связанного входного параметра. На практике это означало бы увеличение общего размера базы данных на несколько порядков по сравнению с текущей ненормализованной структурой.

Операции модификации данных в предложенной архитектуре реализуются значительно проще, чем в нормализованном варианте. Например, добавление нового входного значения для существующего параметра требует лишь копирования соответствующих записей таблицы с заменой идентификаторов входных значений, относящихся к данному параметру, на новые. В нормализованной структуре аналогичная операция потребовала бы сложных манипуляций с дополнительными таблицами и существенного усложнения бизнес-логики приложения.

Предложенный подход актуален для широкого спектра уборочной техники и различных культур. Технические сложности могут возникать при большом количестве факторов, которые необходимо учитывать. При высокой мощности множества входных переменных увеличивается количество правил-продукций, что приводит к объемной работе по вводу правил в программу. В этом случае перспективным является использование нейро-нечетких сетей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с поставленной целью в работе развит подход к решению задачи оптимальной настройки регулируемых параметров рабочих органов комбайна, основанный на внедрении интеллектуальных информационных систем. Краткий итог и основной новый вклад исследования заключается в разработке программной системы и гибкой, сознательно ненормализованной архитектуры базы данных, которые позволяют формализовать, систематизировать и автономно использовать экспертные знания. Практическая значимость работы состоит в возможности использования системы для поддержки эксперта и пользователя при выборе начальных значений параметров, что снижает зависимость от субъективного опыта оператора.

Значительная вариабельность факторов уборки как по времени, так и по площади полей может привести к тому, что в процессе работы первоначально установленные значения параметров станут неадекватными изменившимся условиям. Фактически это означает некорректно определенные значения факторов уборки (засоренность, полеглость и др.), которые влекут за собой выбор значений регулируемых параметров, не обеспечивающих поддержание показателей качества уборки в заданных пределах при необходимой производительности комбайна. Так, например, некорректно установленное значение частоты вращения молотильного барабана может приводить к повышенному дроблению зерна. Обнаруженное отклонение показателей качества от допустимых значений требует корректировки значений регулируемых параметров. Разработка механизма корректировки представляет собой самостоятельную задачу и определяет одно из направлений дальнейших исследований. Другим перспективным направлением является расширение автоматизации измерений значений факторов уборки и показателей качества для непосредственной связи с ИИС, что повысит эффективность ее применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чаплыгин М.Е., Жалнин Э.В. Комплексная оценка эффективности работы современных зерноуборочных комбайнов в условиях южного региона России. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024;18(2):47–54. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-2-47-54>
2. Шуляков А.Г., Юдина Е.М., Алаторцев А.Д., Мацко С.М. Молотилки зерноуборочных комбайнов: проблемы и пути их решений. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2021;(1):107–111. <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2021-87-1-107-111>
3. Maslov G.G., Yudina E.M., Rinas N.A. Increase in Grain Combine Harvester Performance and in Quality of Harvesting Grain Crops. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022;949:012109. <https://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/949/1/0121094>
4. Липовский М.И. Повышение эффективности обмолота в аксиально-роторном комбайне. *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2017;84(4):45–50. <https://doi.org/10.17816/0321-4443-66292>
5. Пастухов А.Г., Бахарев Д.Н., Вольвак С.Ф., Бурнукин А.Е., Швыдченко С.А. Концепция обмолота кукурузы роторным молотильно-сепарирующим устройством с воздушной завесой выгрузного окна. *Агроинженерия*. 2024;26(2):4–12. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-2-4-12>
6. Маслов Г.Г., Трубилин Е.И. К обоснованию параметров зерноуборочных комбайнов и их эффективности. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2016;(2):28–31. URL: <https://www.vimsmit.com/jour/article/view/125> (дата обращения: 15.07.2025).

7. Царев Ю.А., Джигарханов Д.Г. Автоматизация системы настройки технологического процесса зерноуборочного комбайна. *Тракторы и сельхозмашины*. 2009;(12):29–31. URL: <https://journals.eco-vector.com/0321-4443/article/view/68773> (дата обращения: 15.07.2025).
8. Димитров В.П., Борисова Л.В., Нурутдинова И.Н. Метод определения начальных значений регулируемых параметров жатвенной части зерноуборочного комбайна. *Инженерные технологии и системы*. 2022;32(4):552–566. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202204.552-566>
9. Špokas L., Steponavičius D., Butkus V. Reduction of Fuel Consumption of Two Rotors Axial Flow Combine Harvester. *Journal of Food Agriculture and Environment*. 2014;12(2):329–333. URL: <https://www.wfpublisher.com/Abstract/5151> (дата обращения: 15.07.2025).
10. Aldoshin N., Didmanidze O. Harvesting Lupinus Albus Axial Rotary Combine Harvesters. *Research in Agricultural Engineering*. 2018;64(4):209–214. <https://doi.org/10.17221/107/2017-RAE>
11. Алдошин Н.В., Бердышев В.Е., Малла Б. Обоснование режимов работы аксиально-роторных зерноуборочных комбайнов на уборке смешанных посевов. *Вестник федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина»*. 2019;(3):17–22. <https://doi.org/10.34677/1728-7936-2019-3-17-22>
12. Jasper S.P., Zimmermann G.G., Savi D., Neto L.S., Kmiecik L.L., Sobenko L.R. Operational Performance and Energy Efficiency of Axial Harvesters with Single and Double Rotor Systems in Soybean Seed Harvest. *Ciência e Agrotecnologia*. 2021:e031720. <http://dx.doi.org/10.1590/1413-7054202145031720>
13. Жалнин Э.В., Годжаев З.А., Флоренцев С.Н. Концептуальные принципы интеллектуальных сельскохозяйственных машин на примере зерноуборочного комбайна. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017;(6):9–16. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2017-6-9-16>
14. Chen J., Ning X., Li Y., Yang G., Wu P., Chen S. A Fuzzy Control Strategy for the Forward Speed of a Combine Harvester Based on KDD. *Applied Engineering in Agriculture*. 2017;33(1):15. <https://doi.org/10.13031/aea.11299>
15. Zhang K., Cao S., Shen H., Wang H., Xu X., Han T. и др. Wang Fuzzy Control System for Load Stability of Intelligent Combine Harvester. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2018;439(5):052009. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/439/5/052009>
16. Li W., Zhang K., Lv G., Dai H., Zhang C. An Improved Fuzzy Logic Control Method for Combine Harvester's Cleaning System. *Automatic Control and Computer Sciences*. 2022;(56):337–346. <https://doi.org/10.3103/S0146411622040058>
17. Димитров В.П., Борисова Л.В., Тугенгольд А.К., Нурутдинова И.Н. Технологическая настройка машин на основе нечеткой логики. *Вестник Мордовского университета*. 2018;28(2):239–254. <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.239-254>
18. Димитров В.П., Нурутдинова И.Н., Борисова Л.В., Папченко А.А. Технология настройки рабочих органов роторного комбайна на основе нечеткого моделирования. *Инженерные технологии и системы*. 2025;35(1):13–29. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202501.013-029>
19. German D.M., Adams B., Hassan A.E. Continuously Mining Distributed Version Control Systems: An Empirical Study of How Linux Uses Git. *Empirical Software Engineering*. 2016;21(1):260–299. <https://doi.org/10.1007/s10664-014-9356-2>
20. Лазаренко Е.Н., Дорохина Г.В., Гаркуша Д.А. Анализ систем контроля версий. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2023;(2):12–25. URL: [http://paijournal.guiaidn.ru/ru/2023/2\(29\).html](http://paijournal.guiaidn.ru/ru/2023/2(29).html) (дата обращения: 20.07.2025).

REFERENCES

1. Chaplygin M.E., Zhالنin E.V. Comprehensive Evaluation of Modern Combine Harvester Performance in Southern Russia. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024;18(2):47–54. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-2-47-2>

2. Shulakov A.G., Yudina E.M., Alatortsev A.D., Matsko S.V. Combine Harvester Threshers: Problems and Solutions. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2021;(1):107–111. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2021-87-1-107-111>
3. Maslov G.G., Yudina E.M., Rinas N.A. Increase in Grain Combine Harvester Performance and in Quality of Harvesting Grain Crops. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022;949:012109. <https://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/949/1/012109>
4. Lipovskiy M.I. Increasing the Efficiency of Threshing in an Axial Rotary Combine. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2017;84(4):45–50. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17816/0321-4443-66292>
5. Pastukhov A.G., Bakharev D.N., Volvak S.F., Burnukin A.E., Shvydchenko S.A. Concept of Corn Threshing by a Rotary Threshing-and-Separating Unit with an Air Curtain of the Discharge Port. *Agricultural Engineering*. 2024;26(2):4–12. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-2-4-12>
6. Maslov G.G., Trubilin E.I. Revisited Grain Harvesters Parameters Substantiation and Effectiveness of Them. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2016;(2):28–31. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://www.vimsmit.com/jour/article/view/125> (accessed 15.07.2025).
7. Tsarev Yu.A., Dzhigarkhanov D.G. Automation of Tuning System of Technological Process for a Grain Combine Harvester. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2009;76(12):29–31. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://journals.eco-vector.com/0321-4443/article/view/68773> (accessed 15.07.2025).
8. 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. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202204.552-566>
9. Špokas L., Steponavičius D., Butkus V. Reduction of Fuel Consumption of Two Rotors Axial Flow Combine Harvester. *Journal of Food Agriculture and Environment*. 2014;12(2):329–333. Available at: <https://www.wfpublisher.com/Abstract/5151> (accessed 15.07.2025).
10. Aldoshin N., Didmanidze O. Harvesting Lupinus Albus Axial Rotary Combine Harvesters. *Research in Agricultural Engineering*. 2018;64(4):209–214. <https://doi.org/10.17221/107/2017-RAE>
11. Aldoshin N.V., Berdyshev V.Ye., Malla B. Determining Operating Modes of Axial-Rotary Combine Harvesters For Harvesting Mixed Crops. *Vestnik of Federal State Educational Establishment of Higher Professional Education “Moscow State Agroengineering University Named After V.P. Goryachkin”*. 2019;(3):17–22. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.34677/1728-7936-2019-3-17-22>
12. Jasper S.P., Zimmermann G.G., Savi D., Neto L.S., Kmiecik L.L., Sobenko L.R. Operational Performance and Energy Efficiency of Axial Harvesters with Single and Double Rotor Systems in Soybean Seed Harvest. *Ciência e Agrotecnologia*. 2021:e031720. <http://dx.doi.org/10.1590/1413-7054202145031720>
13. Zhalnin E.V., Godzhaev Z.A., Florentsev S.N. Conceptual Principles of Intelligent Agricultural Machines in the Case of Combine Harvester. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2017;(6):9–16. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2017-6-9-16>
14. Chen J., Ning X., Li Y., Yang G., Wu P., Chen S. A Fuzzy Control Strategy for the Forward Speed of a Combine Harvester Based on KDD. *Applied Engineering in Agriculture*. 2017;33(1):15. <https://doi.org/10.13031/aea.11299>
15. Zhang K., Cao S., Shen H., Wang H., Xu X., Han T., et al. Wang Fuzzy Control System for Load Stability of Intelligent Combine Harvester. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2018;439(5):052009. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/439/5/052009>
16. Li W., Zhang K., Lv G., Dai H., Zhang C. An Improved Fuzzy Logic Control Method for Combine Harvester’s Cleaning System. *Automatic Control and Computer Sciences*. 2022;(56):337–346. <https://doi.org/10.3103/S0146411622040058>

17. Dimitrov V.P., Borisova L.V., Tugengold A.K., Nurutdinova I.N. A Technological Adjustment of Agricultural Machines Based on Fuzzy Logic. *Mordovia University Bulletin*. 2018;28(2):239–254. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.239-254>
18. Dimitrov V.P., Nurutdinova I.N., Borisova L.V., Papchenko A.A. Technology for Adjusting Working Tools of a Rotary Harvester Based on Fuzzy Modelling. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(1):13–29. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202501.013-029>
19. German D.M., Adams B., Hassan A.E. Continuously Mining Distributed Version Control Systems: An Empirical Study of How Linux Uses Git. *Empirical Software Engineering*. 2016;21(1):260–299. <https://doi.org/10.1007/s10664-014-9356-2>
20. Lazarenko E.N., Dorokhina G.V., Garkusha D.A. Analysis on Version Control Systems. *Problems of Artificial Intelligence*. 2023;(2):12–25. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: [http://paijournal.guiaidn.ru/ru/2023/2\(29\).html](http://paijournal.guiaidn.ru/ru/2023/2(29).html) (accessed 20.07.2025).

Об авторах:

Димитров Валерий Петрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой управления качеством Донского государственного технического университета (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1439-1674>, Researcher ID: E-4908-2018, Scopus ID: 57195505958, SPIN-код: 5991-4140, kaf-qm@donstu.ru

Нурутдинова Инна Николаевна, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры высшей математики Донского государственного технического университета (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3375-1295>, Researcher ID: HPF-3929-2023, Scopus ID: 57196043287, SPIN-код: 1139-1723, nurut.inna@yandex.ru

Борисова Людмила Викторовна, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой менеджмента и бизнес-процессов Донского государственного технического университета (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6611-4594>, Researcher ID: E-4863-2018, Scopus ID: 7006547874, SPIN-код: 5718-9727, borisovalv09@mail.ru

Черняев Антон Тимофеевич, бакалавр Донского государственного технического университета (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6836-6522>, kaf-qm@donstu.ru

Вклад авторов:

В. П. Димитров – формулирование концепции исследования, интерпретация результатов исследований, подготовка начального варианта текста и выводов.

И. Н. Нурутдинова – обзор литературы, анализ экспертной информации, выбор оптимальных моделей.

Л. В. Борисова – лингвистическое описание предметной области, моделирование нечетких экспертных знаний.

А. Т. Черняев – создание базы нечетких продукционных правил, программирование задачи.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 29.07.2025; поступила после рецензирования 23.01.2026;
принята к публикации 27.02.2026*

About the authors:

Valery P. Dimitrov, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Quality Management, Don State Technical University (1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don 344000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1439-1674>, Researcher ID: E-4908-2018, Scopus ID: 57195505958, SPIN-code: 5991-4140, kaf-qm@donstu.ru

Inna N. Nurutdinova, Cand.Sci (Phys.-Math.), Associate professor, Associate professor of Department of Higher Mathematics, Don State Technical University (1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don 344000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3375-1295>, Researcher ID: HPF-3929-2023, Scopus ID: 57196043287, SPIN-code: 1139-1723, nurut.inna@yandex.ru

Lyudmila V. Borisova, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of Management and Business-processes Department, Don State Technical University (1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don 344000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6611-4594>, Researcher ID: E-4863-2018, Scopus ID: 7006547874, SPIN-code: 5718-9727, borisovalv09@mail.ru

Anton T. Chernyaev, Undergraduate Student, Don State Technical University (1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don 344000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6836-6522>, kaf-qm@donstu.ru

Authors contribution:

V. P. Dimitrov – formulating the basic concept of the study, interpreting the study results, preparing the initial version of the text and formulating the conclusions.

I. N. Nurutdinova – literary analysis, analyzing the expert data, selecting optimal models.

L. V. Borisova – linguistic description of the subject area of the study, modeling of fuzzy expert knowledge.

A. T. Chernyaev – creating a fuzzy production rules base, programming the task.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 29.07.2025; revised 23.01.2026; accepted 27.02.2026