



## Моделирование знаний в задаче поиска причин неисправностей

**В. П. Димитров\***, **Л. В. Борисова**, **К. Л. Хубиян**  
ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)  
\*kaf-qt@donstu.ru

*Введение.* В статье изложено описание подхода к решению задачи поиска причин неисправностей в сложных технических системах на основе моделирования знаний экспертов. Для решения задач диагностики многоуровневых систем, к которым относятся и зерноуборочные комбайны, широко применяются интеллектуальные информационные системы. Формальное описание знаний предметной области является основой построения базы знаний таких систем. Рассмотрена последовательность построения базы знаний экспертной системы, основанной на продукционных правилах. *Материалы и методы.* Подход базируется на использовании таблицы функции неисправностей. В качестве объекта диагностирования рассмотрена одна из подсистем электрооборудования зерноуборочного комбайна – «открытие створок крыши бункера». Основой построения последовательности элементарных проверок является система логических уравнений, описывающих как исправное, так и возможные неисправные состояния подсистемы.

*Результаты исследования.* Сформирована структурно-логическая модель. В результате анализа таблицы функции неисправности определены совокупности элементарных проверок. Выполнен анализ весомости данных проверок на основе четырех критериев. Определена оптимальная последовательность проверок и построено дерево решений для поиска причины неисправности, которое является основой формирования базы знаний интеллектуальной информационной системы. Приводится фрагмент базы знаний.

*Обсуждение и заключение.* Предложенный подход моделирования экспертных знаний повышает результативность работы блока поиска причин неисправностей интеллектуальной системы поддержки принятия решений. Он позволяет структурировать базу экспертных знаний и устанавливать оптимальную последовательность элементарных проверок. Это позволяет определить оптимальную последовательность применения продукционных правил базы знаний, что обеспечивает сокращение времени восстановления работоспособности комбайна.

**Ключевые слова:** интеллектуальная информационная система, принятие решений, зерноуборочный комбайн, диагностика неисправностей, продукционные правила, база знаний

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Димитров, В. П. Моделирование знаний в задаче поиска причин неисправностей / В. П. Димитров, Л. В. Борисова, К. Л. Хубиян. – DOI 10.15507/2658-4123.031.202103.364-379 // Инженерные технологии и системы. – 2021. – Т. 31, № 3. – С. 364–379.

© Димитров В. П., Борисова Л. В., Хубиян К. Л., 2021



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

## Knowledge Modeling in Troubleshooting

V. P. Dimitrov\*, L. V. Borisova, K. L. Hubiyan

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

\*kaf-qm@donstu.ru

*Introduction.* The article describes the approach to solving the problem of complex technical system troubleshooting based on expert knowledge modeling. Intelligent information systems are widely used to solve the problems of diagnostics of multilevel systems including combine harvesters. The formal description of the subject domain knowledge is the framework for building the knowledge base of these systems. The sequence of creating an expert system knowledge base in accordance with production rules is considered.

*Materials and Methods.* The approach is founded on the fault function table. As the object of diagnostics, one of the subsystems of the combine harvester electric equipment “opening the hopper roof flaps” is considered. The basis for constructing a sequence of elementary checks is a system of logical equations describing both the serviceable and possible faulty states of the subsystem.

*Results.* A structural logic model is developed. As a result of analyzing the fault function table, the sets of elementary checks are determined. Four criteria have been used to analyze the weight of these checks. The authors have determined optimal sequence of checks and have developed a decision tree, which allows finding the cause of the malfunction and is the basis for creating the knowledge base of an intelligent information system. A fragment of the knowledge base is given.

*Discussion and Conclusion.* The proposed approach of expert knowledge modelling increases the efficiency of the unit for troubleshooting of the intelligent decision support system. It makes possible to structure the base of expertise and establishing the optimal sequence of elementary checks. This allows determining the optimal sequence of application of the knowledge base production rule that makes it possible to reduce the time of restoring the serviceability of combines.

**Keywords:** intelligent information system, decision making, combine harvester, fault diagnostics, production rules, knowledge base

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

**For citation:** Dimitrov V.P., Borisova L.V., Hubiyan K.L. Knowledge Modeling in Troubleshooting. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(3):364-379. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202103.364-379>

### Введение

Эффективность и результативность уборки зерновых и других культур в значительной степени определяется сменным временем использования зерноуборочного комбайна. При этом основными процессами, помимо управления комбайном, являются технологическая настройка рабочих органов и поиск причин неисправностей [1].

Одним из перспективных направлений повышения эффективности

является использование различных информационных технологий, которые на современных зерноуборочных комбайнах применяются в следующих направлениях<sup>1</sup>:

– контроль и регулирование режимов работы двигателя и рабочих органов;

– измерение и регистрация показателей процесса уборки (количество убранных площадей, бункерного зерна, влажность, «наработка» двигателя и других агрегатов и т. д.);

<sup>1</sup> Цифровое сельское хозяйство: состояние и перспективы развития: науч. издание / В. Ф. Федоренко [и др.]. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2019. 316 с.

– индикация интенсивности потерь после очистки и молотильно-сепарирующего устройства (МСУ);

– автоматическая настройка комбайна на уборку определенной культуры, регулирование загрузки молотилки, вождение (для более поздних моделей) и др.

Целью настоящего исследования является разработка общей схемы формализации знаний предметной области «поиск неисправности» для построения модели в виде системы производственных правил.

### Обзор литературы

Оперативно найденная причина неисправности, которая является результатом реализации комплекса диагностических процедур, позволяет в полевых условиях избежать значительных потерь различного рода за счет снижения времени простоев комбайна. Однако диагностирование реализовано фрагментарно и выполняется в основном в следующем виде:

– штатное диагностирование МСУ, то есть измерение текущих значений параметров и фиксирование их предельных состояний в виде сообщений о несоответствиях. При этом диагноз формируется вручную лицом, принимающим решение (ЛПР), оператором;

– индикация кодов неисправностей (преимущественно для систем электрооборудования и электроники), что является визуализацией внешнего признака без преобразования его в вербальное описание. ЛПР при этом выполняет поиск причины вручную<sup>2</sup>.

Управление техническим состоянием современных сельскохозяйственных машин как мехатронных систем неразрывно связано с выполнением значительного количества диагностических процедур. Постановка диагноза

предполагает необходимость обработки эвристических знаний. Эффективность реализации диагностирования определяется стратегией, принятой ЛПР, и зависит от его компетентности. Следовательно, некомпетентность ЛПР может нивелироваться наличием готового к использованию набора ранжированных стратегий поиска решения [2–5]. В связи с этим разработка и внедрение систем поддержки принятия решений при поиске причин неисправностей является актуальной.

Для решения задач диагностики предлагаются различные подходы. Рассматривается определение диагностических параметров топливной системы двигателей зерноуборочных комбайнов на основе технологических и конструктивных параметров технического состояния [6]. В результате исследований структурной схемы топливной системы двигателей определены параметры технического состояния ее элементов. Указывается, что применение технологических карт совместно с диагностическими средствами позволит снизить расход топлива на 5–10 %. Предлагается метод, основанный на сочетании нейронной сети ВР (BPNN) и теории доказательств DS, для диагностики неисправности блокировки зерноуборочного комбайна [7]. В качестве объекта исследования рассматривались шнек жатки, молотильный барабан и зерновой шнек, а также измельчитель соломы [8]. Эффективность внедрения современных компьютерных систем технического диагностирования и их использования анализируется в ряде работ [9–12]. Отмечается важность определения оптимальной периодичности проведения проверок, при которой затраты на ремонт и потери от простоя машин будут минимальными [13].

<sup>2</sup> Ростсельмаш: Зерноуборочные комбайны [Электронный ресурс]. URL: [http://rostselmash.com/products/grain\\_harvesters/](http://rostselmash.com/products/grain_harvesters/) (дата обращения: 12.03.2021).

В настоящее время активно развивается направление построения диагностических экспертных систем, основанных на методологии теории нечетких множеств [14–16].

Таким образом, анализ научно-исследовательских работ позволяет утверждать, что диагностика сельскохозяйственных машин – это многоцелевой, многофакторный процесс. Число уникальных объектов, связанных с конструктивными особенностями машин велико. Широкое использование различных подсистем (автоматики, электрики, гидравлики и др.) приводит к развитию особенностей разработки алгоритмов поиска неисправностей. Важной является разработка приборной базы диагностики машин и организации технического обслуживания. Внедрение интеллектуальных информационных систем (ИИС) поддержки принятия решений становится перспективным направлением совершенствования процесса поиска неисправностей в полевых условиях. В основе предлагаемого подхода формирования модели предметной области в виде системы продукционных правил, составляющих основу базы знаний ИИС, лежат построение таблиц функций неисправностей для анализа пространства состояний изучаемого объекта диагностирования и формирование структурно-логической модели, описывающей причинно-следственные связи элементов.

### Материалы и методы

Один из эффективных и широко распространенных способов описания поиска причин неисправностей, то есть формирования рационального комплекса стратегий, основан на моделировании знаний экспертов. В связи с этим выбор формального описания

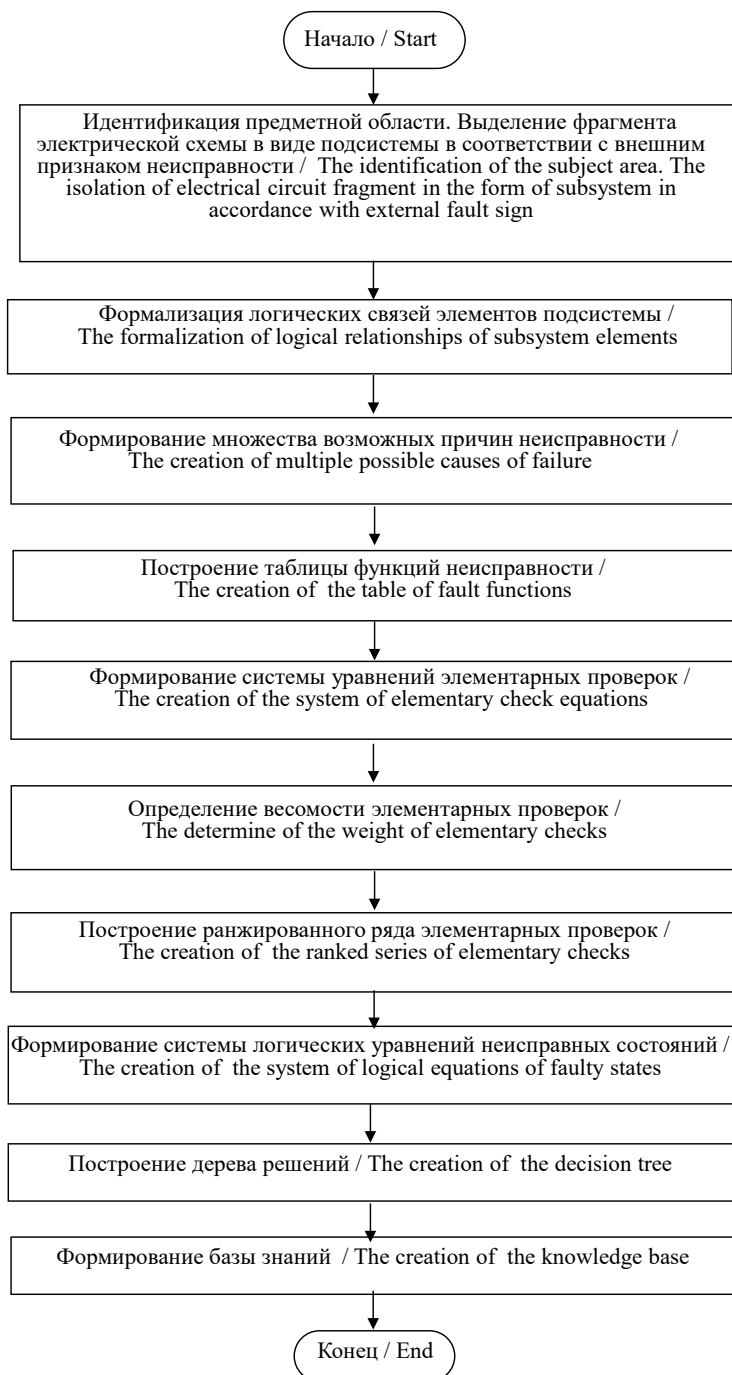
семантических пространств предметной области становится центральной научной проблемой<sup>3</sup>. На рисунке 1 представлена обобщенная схема формализации предметной области.

Далее при анализе предметной области в качестве объекта диагностирования рассмотрена система электрооборудования зерноуборочного комбайна ACROS-550. Электрооборудование зерноуборочного комбайна является важнейшей подсистемой, на долю которой приходится до 30 % отказов [17]. Применяя принцип декомпозиции, по функциональному назначению выделим конечную подсистему «открытие створок крыши бункера» электрооборудования зерноуборочного комбайна.

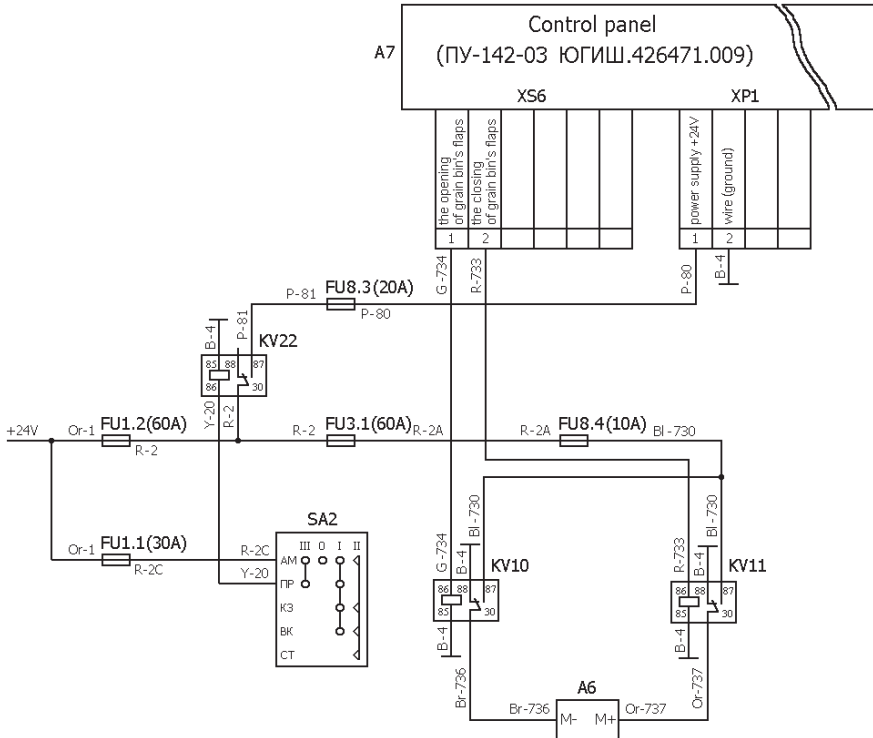
Принципиальная схема данной подсистемы приведена на рисунке 2.

Рисунок 2 содержит следующие обозначения: FU1.1, FU1.2, FU3.1 – предохранители блока предохранителей 111.3732; FU 8.3, FU8.4 – предохранители блока предохранителей 46.3722; KV10, KV11, KV22 – реле 753.3777; SA2 – выключатель стартера и приборов ВК353; А6 – силовой привод DD24-21B5-24-385; А7 – пульт управления комбайна ПУ-142-03 ЮГИШ.426471.032; Or-1 – цепь провода 1 оранжевый; R-2 – цепь провода 2 красный; R-2А – цепь провода 2А красный; R-2С – цепь провода 2С красный; Y-20 – цепь провода 20 желтый; В-4 – цепь провода 4 черный; Р-80 – цепь провода 80 розовый; Р-81 – цепь провода 81 розовый; G-734 – цепь провода 734 зеленый; R-733 – цепь провода 733 красный; В1-730 – цепь провода 730 голубой; Вг-736 – цепь провода 736 коричневый; Or-737 – цепь провода 737 оранжевый.

<sup>3</sup> Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления. М.: Наука, 2006. 333 с.



Р и с. 1. Схема этапов формализации задачи поиска неисправности  
 F i g. 1. Scheme of the steps to formalize the problem of troubleshooting



Р и с. 2. Фрагмент принципиальной схемы электрооборудования зерноуборочного комбайна ACROS-550. Подсистема «управление створками крыши бункера»

Fig. 2. Fragment of the circuit diagram of the ACROS-550 combine harvester electrical equipment. Subsystem “hopper roof flap control”

Пространство состояний изучаемой подсистемы может быть представлено в виде таблицы функции неисправностей (ТФН) (табл. 1)<sup>4</sup>.

При этом принято, что  $\pi_j$  – обозначение элементарных проверок;  $e_i$  – бинарное значение, характеризующее техническое состояние изучаемых элементов подсистемы (0 или 1);  $R_{ji}$  – результаты проверок, значения которых представлены на пересечении строк  $\pi_j$  и столбцов  $e_i$ .

Структурно-логическая модель, описывающая причинно-следственные связи элементов подсистемы «открытие створок крыши бункера» и необходимая для построения ТФН, приведена

на рисунке 3. Условные обозначения элементов подсистемы соответствуют рисунку 2.

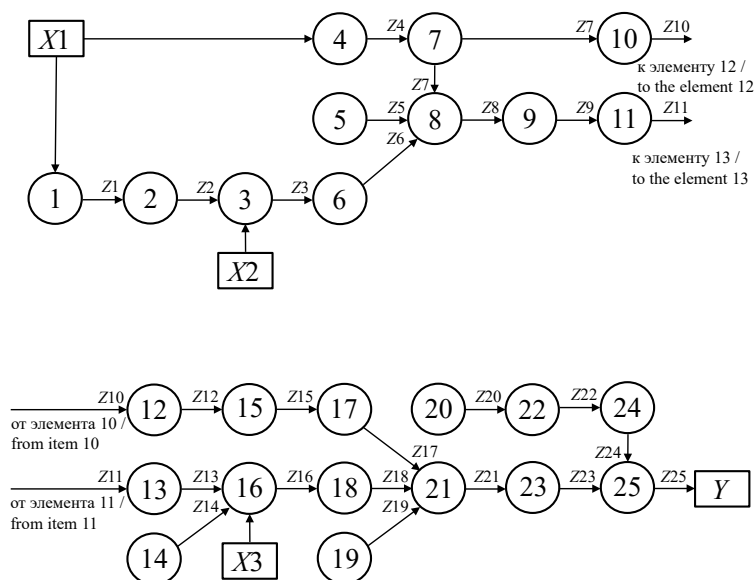
Рисунок 3 содержит следующие обозначения: 1 – FU1.1; 2 – R-2C; 3 – SA2; 4 – FU1.2; 5 – B-4 (на выводе 85 обмотки реле KV22); 6 – Y-20; 7 – R-2; 8 – KV22; 9 – P-81; 10 – FU3.1; 11 – FU 8.3; 12 – R-2A; 13 – P-80; 14 – B-4 (в разъеме XP1 ПУ-142-03); 15 – FU8.4; 16 – A7; 17 – Bl-730; 18 – G-734; 19 – B-4 (на выводе 85 обмотки реле KV10); 20 – B-4 (на выводе 88 нормально замкнутого контакта реле KV11); 21 – KV10; 22 – KV11; 23 – Br-736; 24 – Or-737; 25 – A6; X1 – внешнее

<sup>4</sup> Осипов О. И., Усынин Ю. С. Техническая диагностика автоматизированных электроприводов. М.: Энергоатомиздат, 1991. 160 с.

Таблица 1  
Table 1

**ТФН подсистемы электрооборудования «управление створками крыши бункера»**  
**Troubleshooting table for the electrical equipment subsystem “hopper roof flap control”**

П	E																								
	$e_0$	$e_1$	$e_2$	$e_3$	$e_4$	$e_5$	$e_6$	$e_7$	$e_8$	$e_9$	$e_{10}$	$e_{11}$	$e_{12}$	$e_{13}$	$e_{14}$	$e_{15}$	$e_{16}$	$e_{17}$	...	$e_{25}$					
$\pi_1$	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...	1					
$\pi_2$	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...	1					
$\pi_3$	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...	1					
$\pi_4$	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...	1					
$\pi_5$	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...	1					
$\pi_6$	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...	1					
$\pi_7$	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...	1					
$\pi_8$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...	1					
$\pi_9$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	...	1					
$\pi_{10}$	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	...	1					
$\pi_{11}$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	...	1					
$\pi_{12}$	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	...	1					
$\pi_{13}$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	...	1					
$\pi_{14}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	...	1					
$\pi_{15}$	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	...	1					
$\pi_{16}$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	...	1					
$\pi_{17}$	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	...	1					
$\pi_{18}$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	...	1					
$\pi_{19}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...	1					
$\pi_{20}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...	1					
$\pi_{21}$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...	1					
$\pi_{22}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...	1					
$\pi_{23}$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...	1					
$\pi_{24}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...	1					
$\pi_{25}$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...	0					



Р и с. 3. Структура и логические связи элементов подсистемы «открытие створок крыши бункера» зерноуборочного комбайна ACROS-550

F i g. 3. Structure and logical connections of the elements of the “opening of the hopper roof flaps” subsystem of the ACROS-550 combine harvester



воздействие (напряжение +24 В на входе блоков предохранителей FU1 и FU2);  $X_2$  – внешнее воздействие (нажатие клавиши «открытие створок крыши бункера» на пульте ПУ-142-03);  $X_3$  – внешнее воздействие (установка ключа стартера SA2 в положение I); Z1–Z25 – обозначения выходов элементов логической модели; Y – выходной параметр (перемещение штока силового привода).

Проверки  $\pi_j \in \Pi$  выполняются в соответствии с системой уравнений (1) (см. рис. 3).

$$\left. \begin{aligned} \pi_1 : Z_1 &= e_1 \wedge X_1 \\ \pi_2 : Z_2 &= e_2 \wedge Z_1 \\ \pi_3 : Z_3 &= e_3 \wedge Z_2 \wedge X_2 \\ \pi_4 : Z_4 &= e_4 \wedge X_1 \\ \pi_5 : Z_5 &= e_5 \\ \pi_6 : Z_6 &= e_6 \wedge Z_3 \\ \pi_7 : Z_7 &= e_7 \wedge Z_4 \\ \pi_8 : Z_8 &= e_8 \wedge Z_5 \wedge Z_6 \wedge Z_7 \\ \pi_9 : Z_9 &= e_9 \wedge Z_8 \\ \pi_{10} : Z_{10} &= e_{10} \wedge Z_7 \\ \pi_{11} : Z_{11} &= e_{11} \wedge Z_9 \\ \pi_{12} : Z_{12} &= e_{12} \wedge Z_{10} \\ \pi_{13} : Z_{13} &= e_{13} \wedge Z_{11} \\ \pi_{14} : Z_{14} &= e_{14} \\ \pi_{15} : Z_{15} &= e_{15} \wedge Z_{12} \\ \pi_{16} : Z_{16} &= e_{16} \wedge Z_{13} \wedge Z_{14} \wedge X_3 \\ \pi_{17} : Z_{17} &= e_{17} \wedge Z_{15} \\ \pi_{18} : Z_{18} &= e_{18} \wedge Z_{16} \\ \pi_{19} : Z_{19} &= e_{19} \\ \pi_{20} : Z_{20} &= e_{20} \\ \pi_{21} : Z_{21} &= e_{21} \wedge Z_{17} \wedge Z_{18} \wedge Z_{19} \\ \pi_{22} : Z_{22} &= e_{22} \wedge Z_{20} \\ \pi_{23} : Z_{23} &= e_{23} \wedge Z_{21} \\ \pi_{24} : Z_{24} &= e_{24} \wedge Z_{22} \\ \pi_{25} : Z_{25} &= e_{25} \wedge Z_{23} \wedge Z_{24} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Задача определения минимальной совокупности элементарных проверок

решается посредством анализа ТФН. Сравнив попарно столбец  $e_0$  со столбцами  $e_1, e_2, \dots, e_i (i = 1, 2, \dots, 25)$ , последовательно выделяем множество состояний  $U_l \in U (l = 1, 2, \dots, |U|)$ , которые описываются конъюнкцией дизъюнкций параметров  $z_j = \pi_j \in \Pi (2)$ :

$$\bigwedge_{l=1}^{325} z_{hl} = \bigwedge_{l=1}^{325} (z_{1l} \vee z_{2l} \vee z_{3l} \vee z_{4l} \vee z_{5l} \vee \dots \vee z_{25l})_l. \quad (2)$$

Уравнение (2) раскрывается в виде системы уравнений (3):

$$\left\{ \begin{aligned} U_1 : & \Pi_{01} = (z_1 \vee z_2 \vee z_3 \vee z_6 \vee z_8 \vee z_9 \vee \\ & \vee z_{11} \vee z_{13} \vee z_{16} \vee z_{18} \vee z_{21} \vee z_{23} \vee z_{25})_1 \\ U_2 : & \Pi_{02} = (z_2 \vee z_3 \vee z_6 \vee z_8 \vee z_9 \vee z_{11} \vee \\ & \vee z_{13} \vee z_{16} \vee z_{18} \vee z_{21} \vee z_{23} \vee z_{25})_2 \\ U_3 : & \Pi_{03} = (z_3 \vee z_4 \vee z_6 \vee z_8 \vee z_9 \vee z_{11} \vee \\ & \vee z_{13} \vee z_{16} \vee z_{18} \vee z_{21} \vee z_{23} \vee z_{25})_3 \\ \dots & \dots \\ U_{325} : & \Pi_{325} = (z_{26})_{325} \end{aligned} \right. \quad (3)$$

При этом выражение, адекватно описывающее техническое состояние объекта диагностирования и содержащее минимальную совокупность элементарных проверок при допущении, что неисправным может быть только один любой элемент объекта диагностирования, имеет вид:

$$\bigwedge_{l=1}^{325} z_{hl} = (z_1 \wedge z_2 \wedge z_3 \wedge z_4 \wedge z_5 \wedge \\ \wedge z_6 \wedge z_7 \wedge z_8 \wedge z_9 \wedge z_{10} \wedge z_{11} \wedge z_{12} \wedge \\ \wedge z_{13} \wedge z_{14} \wedge z_{15} \wedge z_{16} \wedge z_{17} \wedge z_{18} \wedge \\ \wedge z_{19} \wedge z_{20} \wedge z_{21} \wedge z_{22} \wedge z_{23} \wedge z_{24} \wedge z_{25}). \quad (4)$$

### Результаты исследования

Алгоритм диагностирования (в виде определенной последовательности элементарных проверок), представленный выражением (4), можно уточнить, используя значения весомости каждой проверки, полученные, например, на основе



метода анализа иерархий (МАИ) [18]. Использовались следующие 4 критерия: К1 – доступность элемента; К2 – наличие инструмента; К3 – блочность элемента; К4 – частота появления отказа.

Ниже приведены результаты расчета вектора глобальных приоритетов (табл. 2) и уточненная, в соответствии с рассчитанными приоритетами, последовательность элементарных проверок (3). Определение весомости критериев К1–К4 относительно друг друга в данной статье не приведено. В результате расчетов определен вектор глобальных приоритетов (табл. 2), в соответствии с которым устанавливается оптимальная последовательность элементарных проверок.

Обобщением вышеизложенного является описание в виде конъюнкции переменных исправного состояния: «при наличии напряжения питания ( $x_1$ ) и установке выключателя стартера и приборов ВК353 в положение «I» ( $x_3$ ), и нажатии на клавишу «↑» управления створками крыши бункера пульта ПУ-142-03 ( $x_2$ ) происходит открытие створок крыши бункера»:

$$Y = (x_1 \wedge x_2 \wedge x_3 \wedge z_{25} \wedge z_{24} \wedge z_{23} \wedge z_{22} \wedge z_{21} \wedge z_{20} \wedge z_{19} \wedge z_{18} \wedge z_{17} \wedge z_{16} \wedge z_{15} \wedge z_{14} \wedge z_{13} \wedge z_{12} \wedge z_{11} \wedge z_{10} \wedge z_9 \wedge z_8 \wedge z_7 \wedge z_6 \wedge z_5 \wedge z_4 \wedge z_3 \wedge z_2 \wedge z_1).$$

При возможных неисправных (при наличии напряжения питания

( $x_1$ ) и установке выключателя стартера и приборов ВК353 в положение «I» ( $x_3$ ), и нажатии на клавишу «↑» управления створками крыши бункера пульта ПУ-142-03 ( $x_2$ ) не происходит открытие створок крыши бункера) состояниях подсистемы «управление створками крыши бункера» электрооборудования зерноуборочного комбайна ACROS-550

$$\bar{Y} = (\bar{x}_1 \wedge x_2 \wedge x_3 \wedge z_{25} \wedge z_{24} \wedge z_{23} \wedge z_{22} \wedge z_{21} \wedge z_{20} \wedge z_{19} \wedge z_{18} \wedge z_{17} \wedge z_{16} \wedge z_{15} \wedge z_{14} \wedge z_{13} \wedge z_{12} \wedge z_{11} \wedge z_{10} \wedge z_9 \wedge z_8 \wedge z_7 \wedge z_6 \wedge z_5 \wedge z_4 \wedge z_3 \wedge z_2 \wedge z_1);$$

$$\bar{Y} = (x_1 \wedge \bar{x}_2 \wedge x_3 \wedge z_{25} \wedge z_{24} \wedge z_{23} \wedge z_{22} \wedge z_{21} \wedge z_{20} \wedge z_{19} \wedge z_{18} \wedge z_{17} \wedge z_{16} \wedge z_{15} \wedge z_{14} \wedge z_{13} \wedge z_{12} \wedge z_{11} \wedge z_{10} \wedge z_9 \wedge z_8 \wedge z_7 \wedge z_6 \wedge z_5 \wedge z_4 \wedge z_3 \wedge z_2 \wedge z_1);$$

...

$$\bar{Y} = (x_1 \wedge x_2 \wedge x_3 \wedge z_{25} \wedge z_{24} \wedge z_{23} \wedge z_{22} \wedge z_{21} \wedge z_{20} \wedge z_{19} \wedge z_{18} \wedge z_{17} \wedge z_{16} \wedge z_{15} \wedge z_{14} \wedge z_{13} \wedge z_{12} \wedge z_{11} \wedge z_{10} \wedge z_9 \wedge z_8 \wedge z_7 \wedge z_6 \wedge z_5 \wedge z_4 \wedge z_3 \wedge z_2 \wedge \bar{z}_1).$$

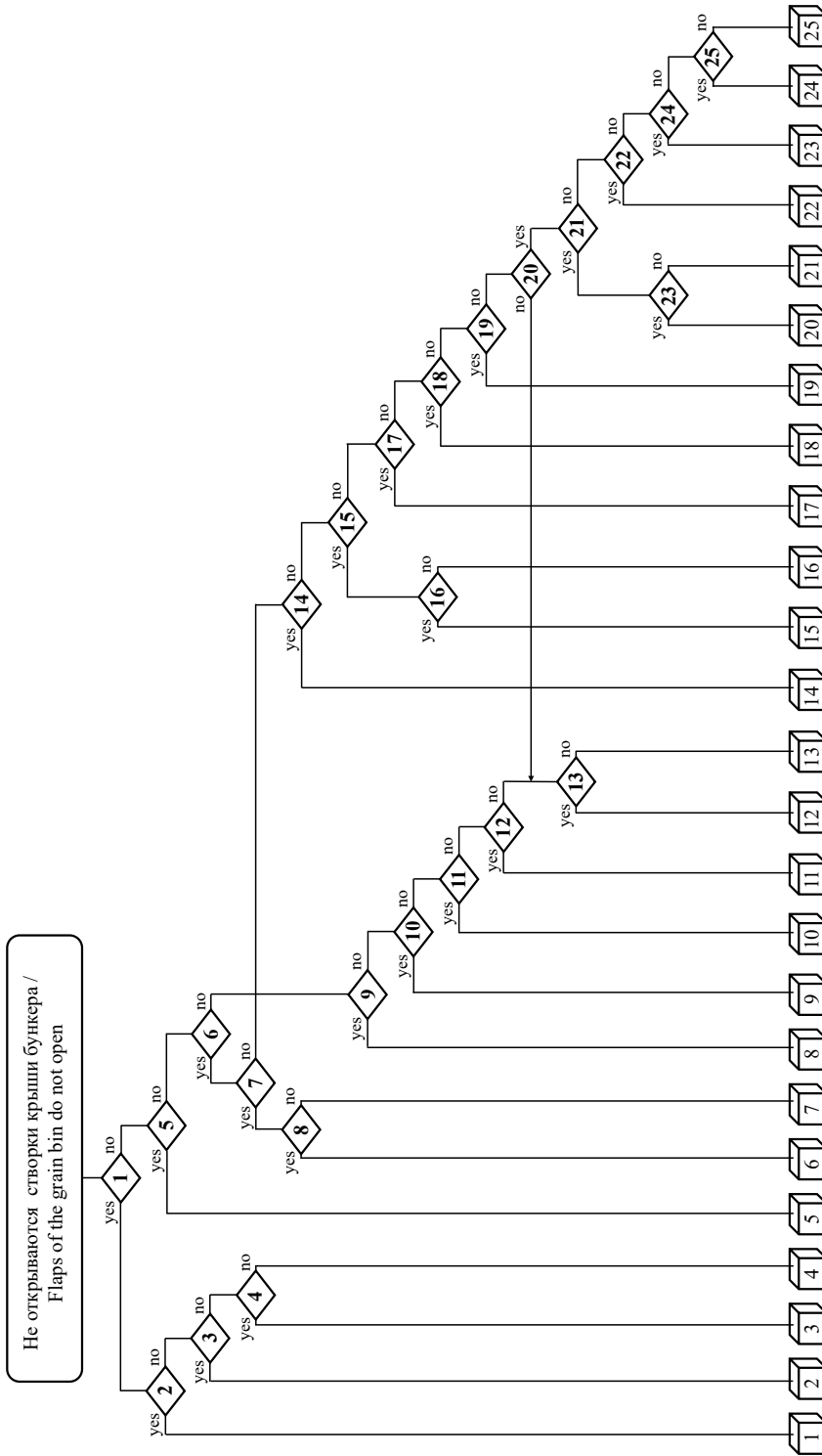
Ниже приведены построенные на основе рассмотренных зависимостей дерево решений (рис. 4), а также фрагмент модели знаний в виде продукционных правил, используемых при построении базы знаний экспертной системы. Представление знаний в виде продукционной модели является наиболее распространенным способом [19].

Т а б л и ц а 2

T a b l e 2

**Значения вектора глобальных приоритетов (фрагмент)**  
**Values of the global priorities vector (fragment)**

Причины / Reasons	П1	П2	П3	П4	П5	П6	П7	П8	П9	П10	П11	П12	П13	...	П22	П23	П24	П25
Значения вектора глобальных приоритетов / Values of the global priorities vector	0,007	0,008	0,010	0,011	0,013	0,014	0,016	0,023	0,029	0,031	0,032	0,036	0,047	...	0,066	0,067	0,068	0,071



Р и с. 4. Дерево решений при поиске неисправности  
F i g. 4. Decision tree for troubleshooting

В ромбиках на рисунке 4 представлены следующие вопросы: 1 – есть напряжение +24 В на проводе Вг-736 у силового привода DD24-21B5-24-385 (блок А6)? 2 – есть соединение на «массу» на проводе Or-737 у силового привода DD24-21B5-24-385 (блок А6)? 3 – есть соединение на «массу» на выводе 30 общего контакта реле KV11(провод Or-737)? 4 – есть соединение на «массу» на проводе В-4 у вывода 88 нормально замкнутого контакта реле KV11? 5 – есть напряжение +24 В на выводе 30 общего контакта реле KV10 (провод Вг-736)? 6 – есть напряжение +24 В на проводе В1-730 у вывода 87 нормально разомкнутого контакта реле KV10? 7 – есть напряжение +24 В на проводе G-734 у вывода 86 обмотки реле KV10? 8 – есть соединение на «массу» на проводе В-4 у вывода 85 обмотки реле KV10? 9 – есть напряжение +24 В на проводе В1-730 у предохранителя FU8.4 (10А)? 10 – есть напряжение +24 В на проводе R-2А у предохранителя FU8.4 (10А)? 11 – есть напряжение +24 В на проводе R-2А у предохранителя FU3.1 (60А)? 12 – есть напряжение +24 В на проводе R-2 у предохранителя FU3.1 (60А)? 13 – есть напряжение +24 В на проводе R-2 у предохранителя FU1.2 (60А)? 14 – есть напряжение +24 В на проводе G-734 в разъеме XS6 пульта управления ПУ-142-03 (блок А7)? 15 – есть напряжение +24 В на проводе Р-80 в разъеме ХР1 пульта управления ПУ-142-03 (блок А7)? 16 – есть соединение на «массу» на проводе В-4 в разъеме ХР1 пульта управления ПУ-142-03 (блок А7)? 17 – есть напряжение +24 В на проводе Р-80 у предохранителя FU8.3 (20А)? 18 – есть напряжение +24 В на проводе Р-81 у предохранителя FU8.3 (20А)? 19 – есть напряжение +24 В на выводе 87 нормально разомкнутого контакта реле KV22 (провод Р-81)? 20 – есть напряжение +24 В на проводе

R-2 у общего вывода 30 реле KV22? 21 – есть напряжение +24 В на проводе Y-20 у вывода 85 обмотки реле KV22? 22 – есть соединение на «массу» на проводе В-4 у вывода 85 обмотки реле KV22? 23 – есть напряжение +24 В на выводе ПР выключателя стартера и приборов ВК353 (SA2)? 24 – есть напряжение +24 В на проводе R-2С у вывода АМ выключателя стартера и приборов ВК353 (SA2)? 25 – есть напряжение +24 В на проводе R-2С у предохранителя FU1.1(60А)? В кубиках на рисунке 4 представлены возможные причины неисправности: 1 – неисправен силовой привод DD24-21B5-24-385 (блок А6); 2 – неисправна цепь провода Or-737; 3 – неисправно реле KV11; 4 – неисправна цепь провода В-4 (соединение на «массу» вывода 88 нормально замкнутого контакта реле KV11); 5 – неисправна цепь провода Вг-736; 6 – неисправно реле KV10; 7 – неисправна цепь провода В-4 (соединение на «массу» вывода 85 обмотки реле KV10); 8 – неисправна цепь провода В1-730; 9 – неисправен предохранитель FU8.4 (10А); 10 – неисправна цепь провода R-2А; 11 – неисправен предохранитель FU3.1 (60А); 12 – неисправна цепь провода R-2; 13 – неисправен предохранитель FU1.2 (60А); 14 – неисправна цепь провода G-734; 15 – неисправен пульт управления А7 (ПУ-142-03); 16 – неисправна цепь провода В-4 (соединение на «массу» в разъеме ХР1 пульта управления ПУ-142-03 (блок А7)); 17 – неисправна цепь провода Р-80; 18 – неисправен предохранитель FU8.3(20А); 19 – неисправна цепь провода Р-81; 20 – неисправно реле KV22; 21 – неисправна цепь провода В-4 (соединение на «массу» вывода 85 обмотки реле KV22); 22 – неисправна цепь провода Y-20; 23 – неисправен выключатель стартера и приборов ВК353 (SA2); 24 – неисправна цепь провода R-2С; 25 – неисправен предохранитель FU1.1(60А).



**ЕСЛИ** при установке выключателя стартера и приборов ВК353 (SA2) в положение «I» и нажатии на клавишу «↑» управления створками крыши бункера пульта управления ПУ-142-03 (блок А7) не происходит открытие створок крыши бункера

...  
*правило 25*

**И есть** напряжением +24 В на проводе Вг-736 у силового привода DD24-21B5-24-385 (блок А6),

**И есть** соединение на «массу» на проводе Ог-737 у силового привода DD24-21B5-24-385 (блок А6),

**И есть** соединение на «массу» на выводе 30 общего контакта реле KV11 (провод Ог-737),

**И есть** соединение на «массу» на проводе В-4 у вывода 88 нормально замкнутого контакта реле KV11,

**И есть** напряжение +24 В на выводе 30 общего контакта реле KV10 (провод Вг-736),

**И есть** напряжение +24 В на проводе В1-730 у вывода 87 нормально разомкнутого контакта реле KV10,

**И есть** напряжение +24 В на проводе G-734 у вывода 86 обмотки реле KV10,

**И есть** соединение на «массу» на проводе В-4 у вывода 85 обмотки реле KV10,

**И есть** напряжение +24 В на проводе В1-730 у предохранителя FU8.4 (10А),

**И есть** напряжение +24 В на проводе R-2А у предохранителя FU8.4 (10А),

...  
**И** напряжение +24 В на проводе R-2С у предохранителя FU1.1(60А) отсутствует,

**ТО неисправен** предохранитель FU1.1(60А).

**Для устранения неисправности** замените предохранитель FU1.1(60А).

Знание атрибута «исправен»/«неисправен» определяется дополни-

тельными диагностическими операциями, например: измерение напряжения на входе катушки электромагнита, измерение напряжения на выходе выключателя и т. п.

### Обсуждение и заключение

Задача поиска причин неисправностей в системах и агрегатах сложных сельскохозяйственных машин является важной. Ее решение в условиях уборки зависит в основном от практического опыта и компетентности механизатора или мастера-диагноста. Для обеспечения информационной поддержки при решении задач диагностирования неисправностей с целью сокращения времени на поиск причин неисправностей целесообразно использование интеллектуальных информационных систем (экспертных систем). При построении таких систем необходимо иметь модель знаний процесса принятия решений. На основе рассматриваемой стратегии поиска неисправности в системах и агрегатах машины предложена методика структуризации знаний предметной области. Данная методика иллюстрирована примером анализа подсистемы электрооборудования зерноуборочного комбайна ACROS-550. Показано, что для определения оптимальной последовательности элементарных проверок целесообразно использовать различные критерии оценки весомости проверок. В результате анализа и моделирования рассматриваемой предметной области (электрооборудование комбайна) сформирована база знаний, включающая более 1 200 производственных правил.

Использование данного подхода при внедрении интеллектуальной информационной системы поддержки принятия решений позволит увеличить коэффициент использования эксплуатационного времени работы комбайна, уменьшить время простоев на устранение неисправностей и, как следствие, повысить результативность уборочных работ.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. 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](https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202001.060-075) // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 1. – С. 60–75. – Рез. англ.
2. Research of Vibroacoustic Diagnostics of Fuel System of Engines of Combine Harvesters / I. Rogovskii, L. Titova, A. Novitskii, V. Rebenko. – DOI [10.22616/ERDev2019.18.N451](https://doi.org/10.22616/ERDev2019.18.N451) // Proceedings of International Scientific Conference “Engineering for Rural Development” (22–24 May 2019). – Jelgava, 2019. – Pp. 291–298.
3. Research of Diagnostic of Combine Harvesters at Levels of Hierarchical Structure of Systems and Units of Hydraulic System / I. L. Rogovskii, B. S. Liubarets, S. A. Voinash [et al.]. – DOI [10.1088/1742-6596/1679/4/042038](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1679/4/042038). – Текст : электронный // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1679.
4. Дунаев, А. В. Актуальность стандартов по техобслуживанию и ремонту сельхозтехники / А. В. Дунаев, В. А. Казакова, В. А. Шинкевич // Стандарты и качество. – 2018. – № 1. – С. 36–38. – URL: <https://ria-stk.ru/stq/adetail.php?ID=165761> (дата обращения: 12.03.2021). – Рез. англ.
5. Liang, Z. Grain Sieve Loss Fuzzy Control System in Rice Combine Harvesters / Z. Liang, Y. Li, L. Xu. – DOI [10.3390/app9010114](https://doi.org/10.3390/app9010114). – Текст : электронный // Applied Sciences. – 2019. – Vol. 9, Issue 1.
6. Research of Daubechies Wavelet Spectrum of Vibroacoustic Signals for Diagnostic of Diesel Engines of Combine Harvesters / L. L. Titova, Yu. M. Chernik, Yu. O. Gumenyuk, M. M. Korobko. – DOI [10.1088/1755-1315/548/3/032030](https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/3/032030). – Текст : электронный // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – Vol. 548, Issue 3.
7. Blockage Fault Diagnosis Method of Combine Harvester Based on BPNN and DS Evidence Theory / J. Chen, K. Xu, Y. F. Wang [et al.]. – DOI [10.1117/12.2265524](https://doi.org/10.1117/12.2265524). – Текст : электронный // Proceedings of 17<sup>th</sup> International Conference on Electronics and Information Engineering (23 January 2017). – Nanjing, 2017.
8. Evaluation of Bearing Reliability of Combine Harvester Straw Chopper / E. Jotautiene, A. Juostas, A. Janulevicius, A. Aboltins. – DOI [10.22616/ERDev2019.18.N332](https://doi.org/10.22616/ERDev2019.18.N332) // Proceedings of International Scientific Conference “Engineering for Rural Development” (22–24 May 2019). – Jelgava, 2019. – Pp. 625–629.
9. Чеботарев, М. И. Экспертный метод факторного анализа эксплуатационной надежности зерноуборочных комбайнов / М. И. Чеботарев, Б. Ф. Тарасенко, Е. А. Шапиро. – DOI [10.21515/1990-4665-136-006](https://doi.org/10.21515/1990-4665-136-006) // Научный журнал КубГАУ. – 2018. – № 136. – С. 71–86. – Рез. англ.
10. Гумелёв, В. Ю. Оптимизация поиска неисправностей электрооборудования автомобиля / В. Ю. Гумелёв. – Текст : электронный // Исследования в области естественных наук. – 2014. – № 4. – URL: <http://science.snauka.ru/2014/04/6722> (дата обращения: 12.03.2021). – Рез. англ.
11. Афоничев, Д. Н. Повышение эффективности использования систем технического диагностирования в сельском хозяйстве / Д. Н. Афоничев, И. И. Аксенов // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2015. – № 4 (47). – С. 109–114. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24986080> (дата обращения: 12.03.2021).
12. Operation Faults Monitoring of Combine Harvester Based on SDAE-BP[J] / X. Chenbo, Y. Guangyou, L. Lang [et al.]. – DOI [10.11975/j.issn.1002-6819.2020.17.006](https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2020.17.006) // Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering. – 2020. – Vol. 36, Issue 17. – Pp. 46–53.
13. 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](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.03.010) // Expert Systems with Applications. – 2010. – Vol. 37, Issue 10. – Pp. 7080–7085.
14. Разработка диагностических интеллектуальных систем на основе онтологий / М. А. Грищенко, Н. О. Дородных, С. А. Коршунов, А. Ю. Юрин. – DOI [10.18287/2223-9537-2018-8-2-265-284](https://doi.org/10.18287/2223-9537-2018-8-2-265-284) // Онтология проектирования. – 2018. – Т. 8, № 2 (28). – С. 265–284. – Рез. англ.
15. Chen, J. Remote Fault Information Acquisition and Diagnosis System of the Combine Harvester Based on LabVIEW / J. Chen, P. Wu, K. Xu. – DOI [10.1142/9789814733878\\_0041](https://doi.org/10.1142/9789814733878_0041) // Applied Mechanics, Mechatronics and Intelligent Systems. – 2016. – Pp. 285–292.

16. Development on Electrical System Performance Test Stand for Combine Harvester / D. Sun, D. Chen, S. Wang, X. Wang. – DOI [10.1016/j.ifacol.2018.08.195](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.195) // IFAC-PapersOnLine. – 2018. – Vol. 51, Issue 17. – Pp. 363–367.

17. Electrical Modification and Experimental Study of Combine Harvester Reaping Unit / P. Wang, M. Tian, H. Wang [et al.]. – DOI [10.1088/1757-899X/790/1/012168](https://doi.org/10.1088/1757-899X/790/1/012168). – Текст : электронный // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 790.

18. **Khan, A. U.** Analytical Hierarchy Process (AHP) and Analytic Network Process Methods and Their Applications: A Twenty Year Review from 2000–2019 / A. U. Khan, Y. Ali. – DOI [10.13033/ijahp.v12i3.822](https://doi.org/10.13033/ijahp.v12i3.822). – Текст : электронный // International Journal of the Analytic Hierarchy Process. – 2020. – Vol. 12, Issue 3.

19. **Рябов, С. Ю.** Интеллектуальный подход к автоматизации технологических и производственных процессов / С. Ю. Рябов. – DOI [10.15827/0236-235X.133.106-113](https://doi.org/10.15827/0236-235X.133.106-113) // Программные продукты и системы. – 2021. – № 1. – С. 106–113. – Рез. англ.

*Поступила 15.03.2021; одобрена после рецензирования 25.04.2021; принята к публикации 14.05.2021*

*Об авторах:*

**Димитров Валерий Петрович**, заведующий кафедрой управления качеством ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, Российская Федерация, 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

**Борисова Людмила Викторовна**, заведующий кафедрой менеджмента и бизнес-процессов ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, Российская Федерация, 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

**Хубиян Капрел Луспаронович**, доцент кафедры управления качеством ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8743-6672>, intelagro-edu@rambler.ru

*Заявленный вклад соавторов:*

В. П. Димитров – анализ предметной области, моделирование знаний.

Л. В. Борисова – разработка схемы формализации знаний и структурно-логической схемы подсистемы электрооборудования.

К. Л. Хубиян – разработка таблицы функций неисправностей, построение дерева решений, получение результатов иллюстративного примера, формулировка правил базы знаний.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. 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. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202001.060-075>

2. Rogovskii I., Titova L., Novitskii A., Rebenko V. Research of Vibroacoustic Diagnostics of Fuel System of Engines of Combine Harvesters. In: Proceedings of International Scientific Conference “Engineering for Rural Development” (22-24 May 2019). Jelgava; 2019. Pp. 291-298. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.22616/ERDev2019.18.N451>

3. Rogovskii I.L., Liubarets B.S., Voinash S.A., et al. Research of Diagnostic of Combine Harvesters at Levels of Hierarchical Structure of Systems and Units of Hydraulic System. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020; 1679. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1679/4/042038>
4. Dunaev A.V., Kazakova V.A., Shinkevich V.A. Relevance of Standards on Servicing and Repair of Agricultural Machinery. *Standarty i kachestvo = Standarts and Quality*. 2018; (1):36-38. Available at: <https://ria-stk.ru/stq/adetail.php?ID=165761> (accessed 12.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
5. Liang Z., Li Y., Xu L. Grain Sieve Loss Fuzzy Control System in Rice Combine Harvesters. *Applied Sciences*. 2019; 9(1). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/app9010114>
6. Titova L.L., Chernik Yu.M., Gumenyuk Yu.O., Korobko M.M. Research of Daubechies Wavelet Spectrum of Vibroacoustic Signals for Diagnostic of Diesel Engines of Combine Harvesters. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020; 548(3). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/3/032030>
7. Chen J., Xu K., Wang Y.F., et al. Blockage Fault Diagnosis Method of Combine Harvester Based on BPNN and DS Evidence Theory. In: Proceedings of 17<sup>th</sup> International Conference on Electronics and Information Engineering (23 January 2017). Nanjing; 2017. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2265524>
8. Jotautiene E., Juostas A., Janulevicius A., Aboltins A. Evaluation of Bearing Reliability of Combine Harvester Straw Chopper. In: Proceedings of International Scientific Conference “Engineering for Rural Development” (22-24 May 2019). Jelgava; 2019. Pp. 625-629. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.22616/ERDev2019.18.N332>
9. Chebotaryev M.I., Tarasenko B.F., Shapiro E.A. Expert Method of Factor Analysis of Operational Reliability of Combine Harvesters. *Nauchnyy zhurnal KubGAU = Scientific Journal of KubSAU*. 2018; (136):71-86. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.21515/1990-4665-136-006>
10. Gumelev V.Yu. Optimization of Search of Malfunctions Vehicle Electric Equipments. *Issledovaniya v oblasti estestvennykh nauk = Researches in Science*. 2014; (4). Available at: <http://science.snauka.ru/2014/04/6722> (accessed 12.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
11. Afonichev D.N., Aksenov I.I. Increasing the Efficiency of Using Technical Diagnostic Systems in Agriculture. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Voronezh State Agrarian University Bulletin*. 2015; (4):109-114. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24986080> (accessed 12.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
12. Chenbo X., Guangyou Y., Lang L., et al. Operation Faults Monitoring of Combine Harvester Based on SDAE-BP[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2020; 36(17):46-53. (In Chin., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2020.17.006>
13. 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>
14. Grischenko M.A., Dorodnykh N.O., Korshunov S.A., Yurin A.Yu. Ontology-Based Development of Diagnostic Intelligent Systems. *Ontologiya proektirovaniya = Ontology of Designing*. 2018; 8(2):265-284. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.18287/2223-9537-2018-8-2-265-284>
15. Chen J., Wu P., Xu K. Remote Fault Information Acquisition and Diagnosis System of the Combine Harvester Based on LabVIEW. *Applied Mechanics, Mechatronics and Intelligent Systems*. 2016; Pp. 285-292. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1142/9789814733878\\_0041](https://doi.org/10.1142/9789814733878_0041)
16. Sun D., Chen D., Wang S., Wang X. Development on Electrical System Performance Test Stand for Combine Harvester. *IFAC-PapersOnLine*. 2018; 51(17):363-367. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.195>
17. Wang P., Tian M., Wang H., et al. Electrical Modification and Experimental Study of Combine Harvester Reaping Unit. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 790. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/790/1/012168>
18. Khan A.U., Ali Y. Analytical Hierarchy Process (AHP) and Analytic Network Process Methods and Their Applications: A Twenty Year Review from 2000–2019. *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*. 2020; 12(3). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.13033/ijahp.v12i3.822>

19. Ryabov S.Yu. The Intelligent Approach to Automation of Technological and Production Processes. *Programmnye produkty i sistemy* = Software & Systems. 2021; (1):106-113. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15827/0236-235X.133.106-113>

*Received 15.03.2021; approved after reviewing 25.04.2021; accepted for publication 14.05.2021*

*About the authors:*

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

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

**Kaprel L. Hubiyani**, Associate Professor of the Chair of Quality Management, Don State Technical University (1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don 344000, Russian Federation), Cand.Sc. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8743-6672>, intelagro-edu@rambler.ru

*Contribution of the authors:*

V. P. Dimitrov – subject area analysis, knowledge modeling.

L. V. Borisova – development of the knowledge formalization scheme and the structural-logical scheme of the electrical equipment subsystem.

K. L. Hubiyani – developing a table of fault functions, constructing a decision tree, obtaining the results of an illustrative example, formulating knowledge base rules.

*All authors have read and approved the final manuscript.*