

УДК 62-529+631.372

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса

ОЦЕНКА КРИТИЧЕСКИХ ПОДСИСТЕМ ТРАКТОРА НА ОСНОВЕ СТАТИСТИКИ ОТКАЗОВ

Хопрянинов Юрий Андреевич
аспирант кафедры гидравлики,
гидропневмоавтоматика и тепловые процессы
SPIN-код: 5734-0738

Yura-khopr@rambler.ru

*Донской Государственный Технический
Университет, Ростов-на-Дону, Россия*

Килина Мария Степановна
кандидат технических наук, доцент кафедры
гидравлики, гидропневмоавтоматика и тепловые
процессы

SPIN-код: 8039-0060

Mariya-kilina@yandex.ru

*Донской Государственный Технический
Университет, Ростов-на-Дону, Россия*

Пелипенко Алексей Юрьевич
кандидат технических наук, доцент кафедры
гидравлики, гидропневмоавтоматика и тепловые
процессы

SPIN-код: 9373-5743

Pelipenko16a@mail.ru

*Донской Государственный Технический
Университет, Ростов-на-Дону, Россия*

В данной статье приведен анализ отказов систем сельскохозяйственных тракторов с шарнирно-сочлененной рамой за 2023–2025 годы на основе аналитики сервисных служб. Целью данного исследования является выявление наиболее критичных систем и элементов, оказывающих наибольшее влияние на общую надёжность тракторов в процессе выполнения сельскохозяйственных работ. Исследование основано на системном подходе, при котором трактор рассматривается как совокупность взаимосвязанных функциональных подсистем. Проведён анализ распределения отказов между основными системами машины и выполнено их ранжирование по степени влияния на общую статистику отказов. Для оценки значимости отдельных подсистем использованы методы анализа принятия решений, включая минимаксный критерий и энтропийный анализ вероятностного распределения отказов. Полученные результаты позволили определить системы, оказывающие наибольшее влияние на надёжность техники, а также выделить элементы, вносящие наибольший вклад в частоту отказов, в составе гидравлической системы рулевого

UDC 62-529+631.372

4.3.1. Technologies machinery and equipment for the agro-industrial complex

EVALUATION OF CRITICAL TRACTOR SUBSYSTEMS BASED ON FAILURE STATISTICS

Khopryaninov Yuri Andreevich
Postgraduate Student, Department of Hydraulics,
Hydropneumatic Automation, and Thermal Processes
RSCI SPIN-code: 5734-0738

Yura-khopr@rambler.ru

*Don State Technical University, Rostov-on-Don,
Russia*

Kilina Maria Stepanovna
Candidate of Technical Sciences, Associate
Professor, Department of Hydraulics,
Hydropneumatic Automation, and Thermal Processes

SPIN-code: 8039-0060

Mariya-kilina@yandex.ru

*Don State Technical University, Rostov-on-Don,
Russia*

Pelipenko Alexey Yurievich
Candidate of Technical Sciences, Associate
Professor, Department of Hydraulics,
Hydropneumatic Automation, and Thermal Processes

RSCI SPIN-code: 9373-5743

Pelipenko16a@mail.ru

*Don State Technical University, Rostov-on-Don,
Russia*

This article presents an analysis of system failures in articulated-frame agricultural tractors for the period 2023–2025, based on data from service departments. The objective of this study is to identify the most critical systems and components that exert the greatest influence on the overall reliability of these tractors during agricultural operations. The research employs a systems-based approach, treating the tractor as an aggregate of interconnected functional subsystems. An analysis was conducted to determine the distribution of failures across the machine's major systems, followed by a ranking of these systems based on their impact on overall failure statistics. To assess the significance of individual subsystems, decision-making analysis methods were utilized, including the minimax criterion and entropy analysis of the failure probability distribution. The results obtained enabled the identification of the systems exerting the greatest influence on equipment reliability, as well as the specific components within the hydraulic steering system that contribute most significantly to failure frequency. The patterns established in this study can be leveraged to enhance tractor reliability, refine design solutions, and substantiate the implementation of technical

управления. Установленные закономерности могут быть использованы для повышения надёжности тракторов, совершенствования конструктивных решений и обоснования внедрения методов мониторинга технического состояния и предиктивной диагностики сельскохозяйственной техники

condition monitoring and predictive diagnostics methods for agricultural machinery

Ключевые слова: СИСТЕМЫ ТРАКТОРА, ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ СИСТЕМА, ОТКАЗЫ, ЗНАЧИМОСТЬ ПАРАМЕТРА, ЭНТРОПИЯ

Keywords: TRACTOR SYSTEMS, HYDRAULIC SYSTEM, FAILURES, PARAMETER SIGNIFICANCE, ENTROPY

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-220-041>

Введение

Эксплуатация сельскохозяйственных тракторов характеризуется высокой нагрузкой на основные функциональные системы тракторов и ограниченными временными интервалами выполнения работ [1]. Усложнение конструкций современных тракторов с шарнирно-сочлененной рамой приводит к росту числа потенциальных отказов.

В настоящее время для управления тяжёлыми сельскохозяйственными и строительными машинами применяются гидравлические системы, которые позволяют снизить усилие, прикладываемое оператором, особенно в случае невысокой скорости движения [2]. Гидравлическая система рулевого управления обеспечивает как комфорт водителя, так и точную управляемость машиной, что особенно важно для сельскохозяйственных тракторов, работающих при высоких нагрузках на неровном грунте, и напрямую влияет на безопасность и эффективность работы оператора. Таким образом функциональная значимость гидравлических и других систем трактора, обуславливает необходимость проведения анализа отказов, возникающих в процессе эксплуатации.

Рассмотрен анализ данных гарантийных отказов по тракторам за 2023–2025 годы, 18 месяцев из которых приходилось на сезон сельскохозяйственных работ. На основании представленных данных было

<http://ej.kubagro.ru/2026/06/pdf/41.pdf>

установлено, что значительная доля отказов приходится на гидравлические системы, что представлено на рисунке 1. Сводные данные представлены в таблице 1 за 29 месяцев и содержат информацию о 8981 единицах техники на которые пришлось 11182 отказов, из которых 3462 относятся к гидравлической системе трактора.

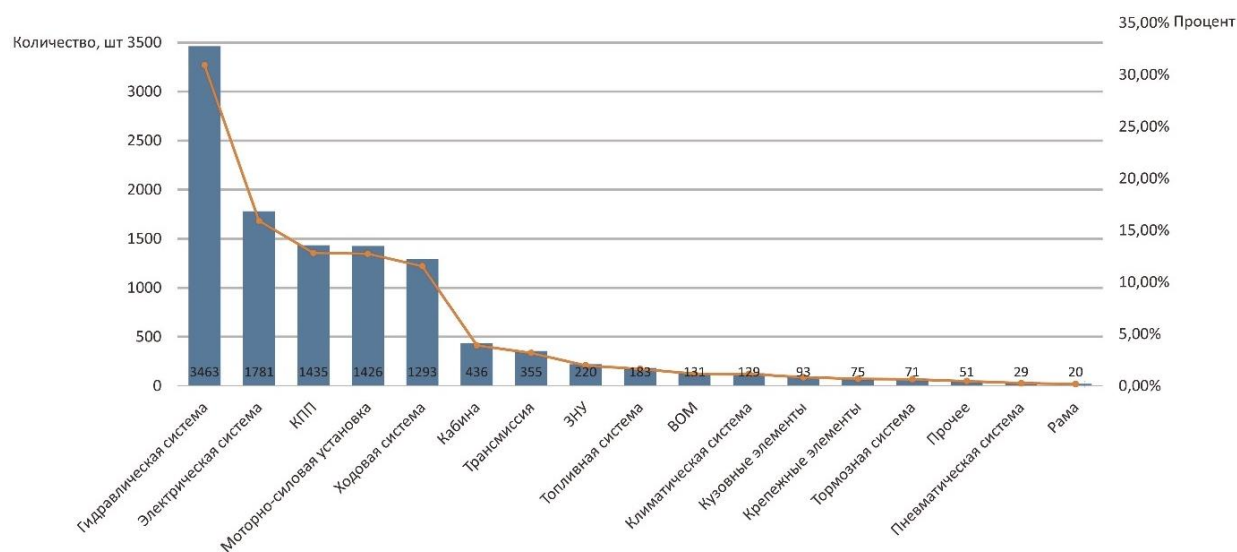


Рисунок 1 – Элементы систем трактора

В рамках рассматриваемой детерминированной ситуации принятия решений, каждому варианту систем соответствует единственное внешнее состояние [3]. В качестве вариантов рассматриваются системы трактора, для которых по сводным данным было определено количество отказов. Внешнее состояние соответствует условиям эксплуатации тракторов, и в данном случае является фиксированным, а потери e_i , связанные с отказами элементов систем, получены исходя из частоты отказов, при переводе процентной доли в безразмерную величину. На основе полученных данных было проведено ранжирование всех систем по уровню их вклада в общее число отказов.

Таблица 1 – Отказы систем трактора

№ п/п	Система	Количество отказов, шт.	Доля, %	Потери
1	Гидравлическая система	3462	30,96%	0,3096
2	Электрическая система	1780	15,92%	0,1592
3	Коробка передач	1435	12,83%	0,1283
4	Моторно-силовая установка	1426	12,75%	0,1275
5	Ходовая система	1292	11,55%	0,1155
6	Кабина	436	3,90%	0,0390
7	Трансмиссия (без учета коробки передач)	353	3,16%	0,0316
8	Заднее навесное устройство (ЗНУ)	219	1,96%	0,0196
9	Топливная система	183	1,64%	0,0164
10	Вал отбора мощности (ВОМ)	131	1,17%	0,0117
11	Климатическая система	129	1,15%	0,0115
12	Кузовные элементы	93	0,83%	0,0083
13	Крепежные элементы	75	0,67%	0,0067
14	Тормозная система	70	0,63%	0,0063
15	Пневматическая система	29	0,26%	0,0026
16	Рама	20	0,18%	0,0018
17	Прочие элементы	49	0,44%	0,0044
	Итого	11182	100%	

Большинство из отказов гидравлической системы, представленные на рисунке 2, относится к течи масла из гидроаппаратов - 1832 отказа, проявляющаяся в течение всего гарантийного периода эксплуатации техники. Разрушение и деформация компонентов фиксировалась 327 отказов, также связанные с полным или частичным отсутствием управлением трактора – 287 отказов, вследствие отказа элементов рулевой системы трактора и нарушением параметров давления в системе – 310 отказов.



Рисунок 2 – Виды отказов гидравлической системы трактора

Согласно выборке данных отношение количества зарегистрированных отказов к количеству тракторов за 3 года составило 1,24. Таким образом в среднем на одну единицу техники приходится более одного отказа в гарантийный период, что обосновывает необходимость системного анализа и ранжирования наиболее проблемных систем.

Анализ данных по отказам направлен на выявление факторов, влияющих на функционирование систем трактора в условиях его эксплуатации. Для этого применяется системный подход, при котором техническая система рассматривается как совокупность взаимосвязанных элементов, отказ каждого из которых может оказывать влияние на работоспособность и безопасность машины в целом [4].

Системный анализ технических систем представляет собой методологический подход, для выявления и анализа отказов с учётом взаимосвязей между элементами систем. В применении к мобильной технике основной задачей системного подхода является идентификация отказов отдельных элементов и оценка их последствий для функционирования всей системы, что позволяет определить наиболее

критичные системы и подсистемы. Системный подход в работе реализован как статистический анализ отказов с их распределением по системам трактора и оценкой вклада каждой системы, что позволяет сформировать обоснованное представление о распределении отказов между системами трактора. Это позволит провести оценку безотказной работы систем, то есть способности выполнять требуемые функции в течение некоторой наработки в заданных режимах и условиях применения, и анализа надёжности отдельных систем и аппаратов [5,6]. Количественная оценка надёжности системы основана на оценке надёжности отдельных элементов. Оценка производится через ряд характеристик и показателей надёжности. Эти показатели основаны на применении теории вероятностей и математической статистики [7]. Для оценки надёжности могут быть применены: вероятность отказа, плотность дефектов, вероятность безотказной работы, интенсивность отказов.

Сравнительный анализ систем по минимаксному критерию и энтропии В качестве оценочной функции используется минимаксный критерий, для определения наихудшего возможного исхода, который соответствует его частоте отказов. Использование данного критерия позволяет определить систему, которая оказывает наибольшее влияние на общую статистику отказов. Исходя из данной выборки, согласно минимаксному критерию равному 0,3096, самым слабым местом является гидравлическая система трактора.

При этом применение минимаксного критерия в детерминированной постановке приводит к выбору элемента с максимальной частотой отказов.

Для определения значимости параметров, произведен расчёт энтропии системы, соответствующую вероятности появления.

$$H = - \sum_{i=1}^n q_i \cdot \ln q_i \quad (1)$$

где q_i – вероятность проявления.

Энтропия имеет максимальную величину, когда все значения q_i равновероятны и в этом случае ни одно из возможных значений параметра не имеет приоритета по отношению к другим, что является полной неопределенностью. При этом если отказы одного из элементов имеет вероятность появления = 1, то значение энтропии будет равно 0. Для данных систем трактора получено значение энтропии, рассчитанное по формуле (1)

$$H = 2,076$$

При равновероятных значениях отказов всех систем трактора максимальная энтропия, при которой наблюдается полная неопределенность равна 2,883.

На основе полученных расчётных данных получено значение отношения энтропии отказов систем трактора к максимально возможному значению равное 0,73, что указывает на умеренную неравномерность распределения, однако при этом присутствуют элементы с повышенной частотой отказов. Также получено значение значимости параметров систем трактора исходя из оценочно функцией, которой является частота отказов, и энтропии. Значимости параметров, с учетом энтропии, для систем трактора представлены на рисунке 3. Полученные данные показывают, что гидравлическая система оказывает наибольшее влияние на общую статистику отказов трактора.

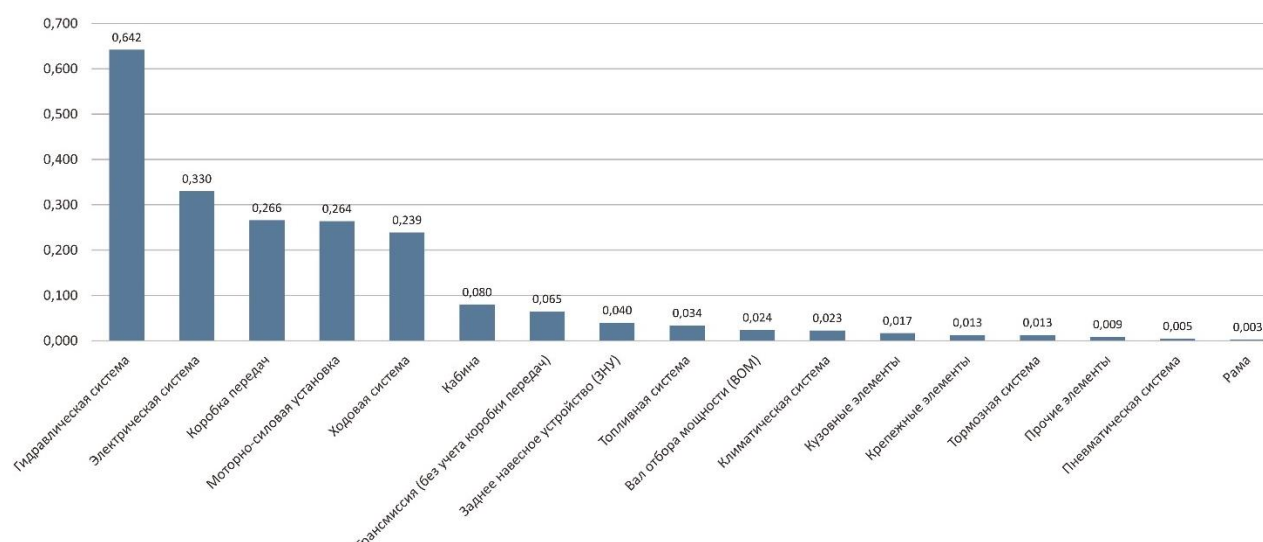


Рисунок 3 – Значимость параметра с учетом энтропии

На основе усреднённых данных по стоимости по Брянской, Липецкой, Оренбургской области и Ставропольскому краю в сезон за 2025 год, стоимость вызова специалиста сервисного центра составляет 15000 рублей, без учета стоимости заменяемых компонентов.

При детальном анализе гидравлических подсистем трактора с шарнирно-сочлененной рамой, наиболее проблемной оказалась рулевая гидросистема. В состав данной системы входит насос переменной производительности с LS управлением, насос-дозатор с усилителем потока, клапан приоритета, блок автоматического вождения, гидроцилиндры поворота рамы, клапаны «ИЛИ».

Рассмотрен анализ отказов рулевой гидросистемы за период с 2023 по 2025 год, представленный на рисунке 4, и содержащий данные о 421 отказе. Из дальнейшего анализа были исключены 18 отказов, возникших до начала эксплуатации трактора. На основании представленных данных, установлено, что значительная доля относится к насосам-дозаторам.

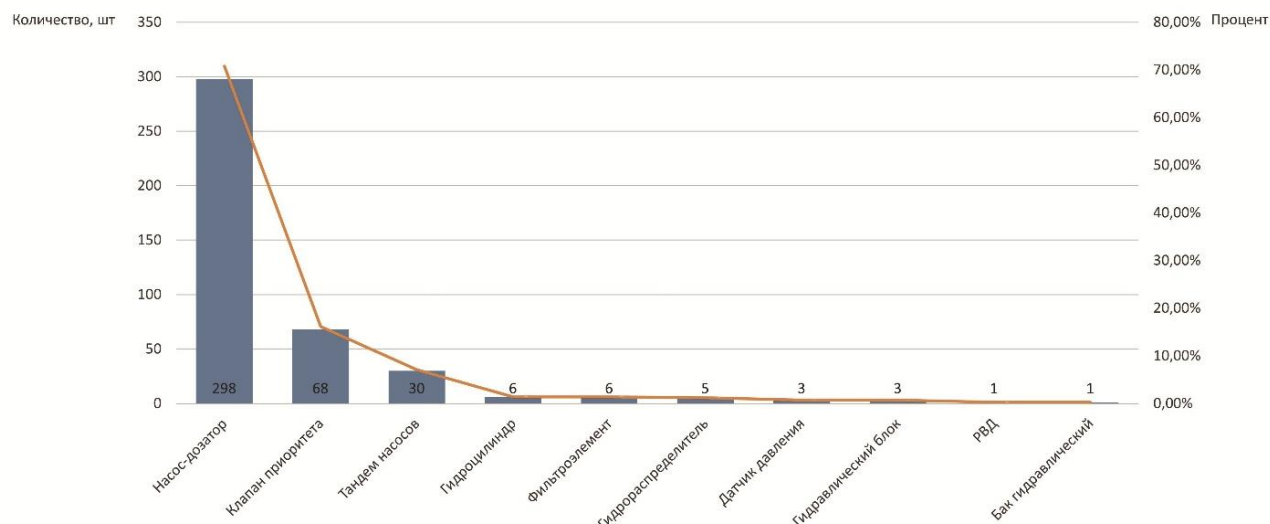


Рисунок 4 – Элементы системы рулевой гидросистемы

При этом также было проведено ранжирование всех элементов по уровню их вклада в общее число эксплуатационных отказов рулевой гидросистемы, представленных в таблице 2.

Таблица 2 – Отказы рулевой гидравлической системы

№ п/п	Элемент	Количество отказов, шт.	Доля, %	Потери
1	Насос-дозатор	280	69,48%	0,6948
2	Клапан приоритета	68	16,87%	0,1687
3	Тандем насосов	30	7,44%	0,0744
4	Гидроцилиндр	6	1,49%	0,0149
5	Фильтроэлемент	6	1,49%	0,0149
6	Гидрораспределитель	5	1,24%	0,0124
7	Гидравлический блок	3	0,74%	0,0074
8	Датчик давления	3	0,74%	0,0074
9	Бак гидравлический	1	0,25%	0,0025
10	Рукав высокого давления	1	0,25%	0,0025

Сводные данные по распределению 403 эксплуатационных отказов между элементами рулевой гидросистемы представлены на рисунке 5.

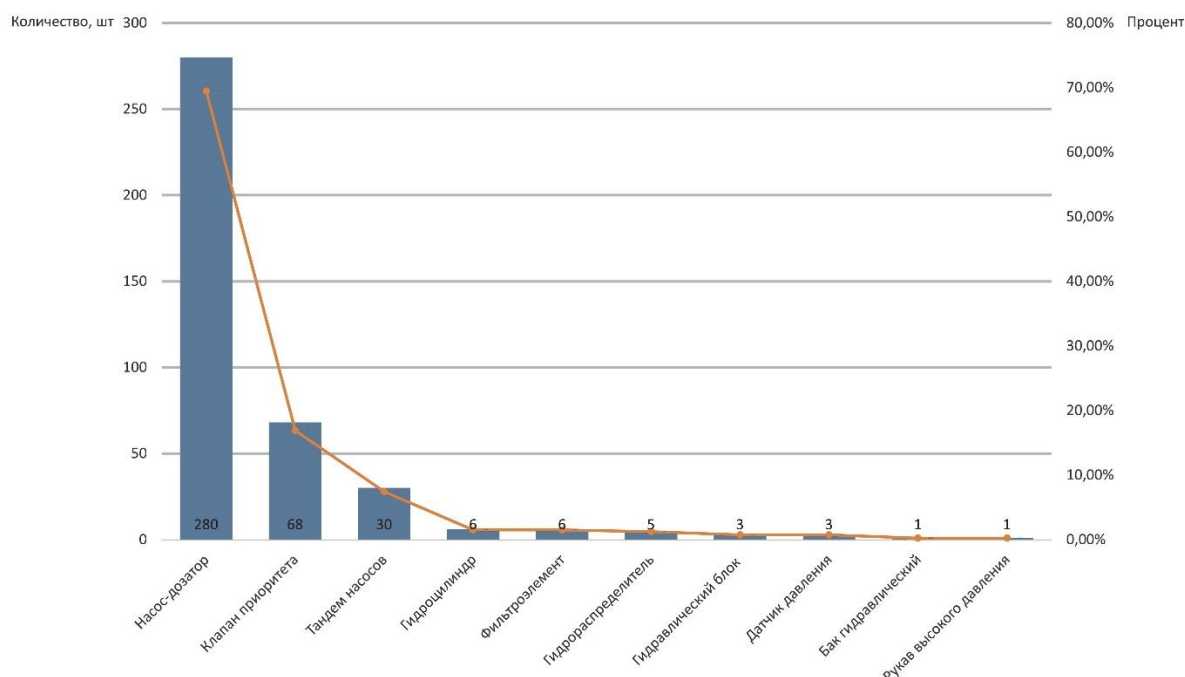


Рисунок 5 – Отказы элементов рулевой гидросистемы, возникшие при эксплуатации трактора

Для элементов данной системы получено значение энтропии $H = 1,0002$, при максимальном значении энтропии равной $2,303$. На основе полученных расчётных данных получено значение отношения энтропии отказов систем трактора к максимально возможному значению равное $0,43$, это показывает, что отказы сконцентрированы в нескольких элементах. Значимости параметров, с учетом энтропии, для элементов рулевой гидросистемы представлены на рисунке 6.

Наиболее критическими местами гидросистемы являются: насос-дозатор, клапан приоритета и тандем-насосов.

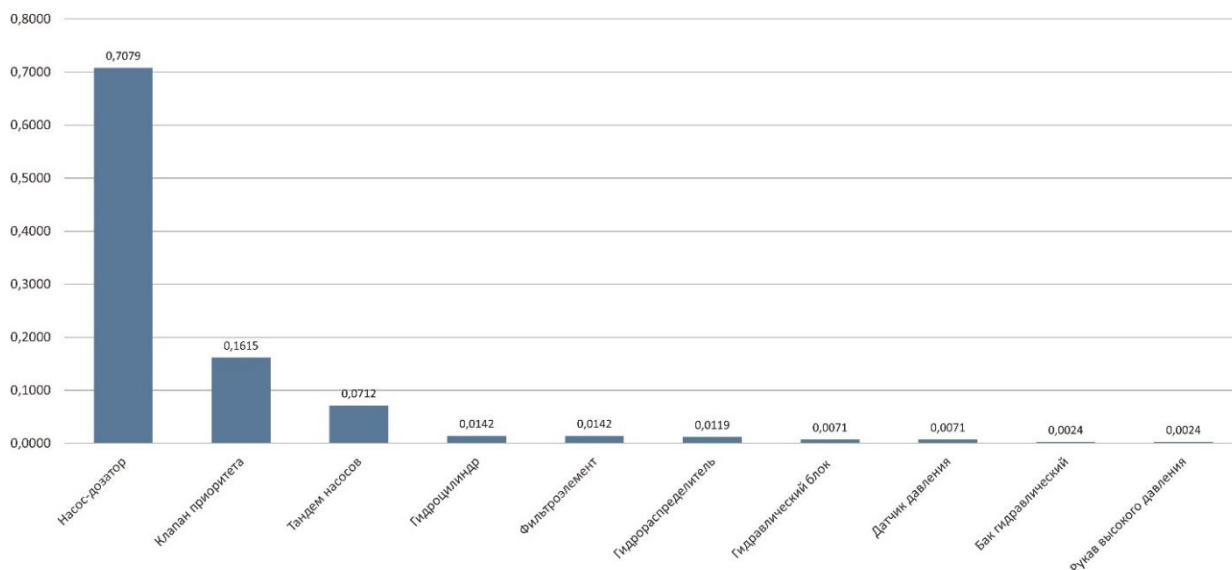


Рисунок 6 – Значимость параметра с учетом энтропии для рулевой гидросистемы

Таким образом внедрение предиктивной диагностики, предназначенной для мониторинга состояния в режиме реального времени для прогнозируемого технического обслуживания, позволит снизить затраты на внеплановые выезды специалистов сервисной службы, а прогнозирование возможных неисправностей позволит планировать обслуживание сельскохозяйственной техники, выполнять его с предварительной подготовкой необходимых запасных частей, инструмента в специализированных местах и в удобное время [8].

Экономический эффект предиктивной диагностики формируется не только за счёт сокращения затрат на выезды, но и за счёт снижения простоя техники, особенно в период полевых работ, на которые приходится большая часть отказов [9, 10].

Заключение. Проведённый статистический анализ гарантийных отказов тракторов с шарнирно-сочленённой рамой за 2023–2025 гг. показал, что гидравлическая система является наиболее проблемной подсистемой, на которую приходится 30,96 % всех отказов. В рулевой гидравлической системе приходится отказов на насос-дозатор 69,48 % и клапан приоритета 16,87 %. Для оценки применялся минимаксный критерий и энтропийный

анализ, что подтвердило доминирующий вклад гидравлической системы и входящей в её состав рулевой гидросистемы, в общую структуру отказов, а расчёт значимости параметров с учётом энтропии позволил ранжировать системы по степени влияния отказов на системы. Полученные результаты позволят произвести оценку надёжности. Внедрение предиктивной диагностики гидравлической системы позволит снизить затраты на внеплановые ремонты и сократить простои техники в сезон полевых работ.

Список литературы

1. Napiorkowski, Jerzy & Gonera, Jarosław. (2020). Analysis of Failures and Reliability Model of Farm Tractors. *Agricultural Engineering*. 24. 89-101. 10.1515/agriceng-2020-0020.
2. Zardin, Barbara & Borghi, M. & Gherardini, Francesco & Zanasi, Nicholas. (2018). Modelling and Simulation of a Hydrostatic Steering System for Agricultural Tractors. *Energies*. 11. 230. 10.3390/en11010230.
3. Э. Мушик, П. Мюллер Методы принятия технических решений: Пер. с нем.— М.: Мир, 1990. — 208 с., ил. ISBN 5-03-001284-2
4. Беркут, В. П., Дубинина, Е. А. Системный подход и системный анализ как методологические средства научного исследования / В. П. Беркут, Е. А. Дубинина // Гуманитарный вестник ВА РВСН. – 2020. – 3 (20). – С. 28-41.
5. Breznická, A., Kohutiar, M., Krbat'a, M., Eckert, M., & Mikuš, P. (2023). Reliability Analysis during the Life Cycle of a Technical System and the Monitoring of Reliability Properties. *Syst.*, 11, 556.
6. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016
7. Kopáček, Jaroslav & Fojtášek, Kamil & Dvořák, Lukáš. (2016). Reliability of fluid systems. *EPJ Web of Conferences*. 114. 02057. 10.1051/epjconf/201611402057.
8. Обзор вариантов применения диагностических систем на мобильных машинах / Хопряминов Ю.А., Килина М.С., Пелипенко А.Ю. // Технические и технологические системы : материалы XVI Международной научной конференции «ТТС-25» (23–24 декабря 2025 года): в 2 т. / ФГБОУ ВО «КубГТУ», ФГК ВОУ ВО «КВВАУЛ им. А.К. Серова». – Краснодар: Издательский Дом – Юг. Т. 1. – 2025. – 300 с
9. Kim, Doyun & Heo, Tae-Young. (2022). Anomaly Detection with Feature Extraction Based on Machine Learning Using Hydraulic System IoT Sensor Data. *Sensors*. 22. 10.3390/s22072479.
10. Якушин Д.И. Имитационная модель оценки эффективности внедрения системы предиктивного обслуживания оборудования / Д.И. Якушин, В.Н. Денисов // Международный научно-исследовательский журнал. — 2025. — №8 (158). — URL: <https://research-journal.org/archive/8-158-2025-august/10.60797/IRJ.2025.158.42> (дата обращения: 04.02.2026). — DOI: 10.60797/IRJ.2025.158.42

References

1. Napiorkowski, Jerzy & Gonera, Jarosław. (2020). Analysis of Failures and Reliability Model of Farm Tractors. *Agricultural Engineering*. 24. 89-101. 10.1515/agriceng-2020-0020.
2. Zardin, Barbara & Borghi, M. & Gherardini, Francesco & Zanasi, Nicholas. (2018). Modelling and Simulation of a Hydrostatic Steering System for Agricultural Tractors. *Energies*. 11. 230. 10.3390/en11010230.
3. Je. Mushik, P. Mjuller Metody prinjatija tehničkih reshenij: Per. s nem.— M.: Mir, 1990. — 208 s., il. ISBN 5-03-001284-2
4. Berkut, V. P., Dubinina, E. A. Sistemnyj podhod i sistemnyj analiz kak metodologičeskie sredstva nauchnogo issledovanija / V. P. Berkut, E. A. Dubinina // *Gumanitarnyj vestnik VA RVSU*. — 2020. — 3 (20). — S. 28-41.
5. Breznická, A., Kohutiar, M., Krbaťa, M., Eckert, M., & Mikuš, P. (2023). Reliability Analysis during the Life Cycle of a Technical System and the Monitoring of Reliability Properties. *Syst.*, 11, 556.
6. GOST 27.002-2015. Nadezhnost' v tehnike. Terminy i opredelenija. M.: Standartinform, 2016
7. Kopáček, Jaroslav & Fojtášek, Kamil & Dvořák, Lukáš. (2016). Reliability of fluid systems. *EPJ Web of Conferences*. 114. 02057. 10.1051/epjconf/201611402057.
8. Obzor variantov primeneniya diagnostičeskikh sistem na mobil'nyh mashinah / Hoprjaninov Ju.A., Kilina M.S., Pelipenko A.Ju. // *Tehničeskie i tehnologičeskie sistemy : materialy XVI Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «TTS-25» (23–24 dekabrja 2025 goda): v 2 t. / FGBOU VO «KubGTU», FGK VOU VO «KVVAUL im. A.K. Serova»*. — Krasnodar: Izdatel'skij Dom – Jug. T. 1. — 2025. — 300 s
9. Kim, Doyun & Heo, Tae-Young. (2022). Anomaly Detection with Feature Extraction Based on Machine Learning Using Hydraulic System IoT Sensor Data. *Sensors*. 22. 10.3390/s22072479.
10. Jakushin D.I. Imitacionnaja model' ocenki jeffektivnosti vnedrenija sistemy prediktivnogo obsluzhivaniya oborudovanija / D.I. Jakushin, V.N. Denisov // *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal*. — 2025. — №8 (158). — URL: <https://research-journal.org/archive/8-158-2025-august/10.60797/IRJ.2025.158.42> (data obrashhenija: 04.02.2026). — DOI: 10.60797/IRJ.2025.158.42