

8. Shevchuk, V.V. Obgruntuvannia parametriv ta rezhimiv roboti golchatoi boroni: spetsialnost 05.05.11 "Mashini i zasobi mekhanizatsii silskogopodarskogo virobnitstva": avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk / Shevchuk Vitalii Viktorovich. – Lviv, 2015. – 23 s.

9. Sineokov, G.N. Teoriia i raschet pochvoobrabatyvaiushchikh mashin: kniga / G.N. Sineokov, I.M. Panov. – Moskva: Mashinostroenie, 1977. – 328 s.

10. PTC MathCAD: [website] / PTC Inc. – 2023. – URL: www.mathcad.com (data obrashcheniia: 16.03.2023).



УДК 613.3

DOI: 10.53083/1996-4277-2023-225-7-87-92

С.В. Фефелова, М.Ф. Туктаров

S.V. Fefelova, M.F. Tuktarov

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗРАБОТАННЫХ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ЗЕРНООЧИСТИТЕЛЬНЫХ МАШИН

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE DEVELOPED LINEAR ELECTRIC DRIVES OF GRAIN CLEANING MACHINES

Ключевые слова: надежность, линейный электропривод, безотказная работа, работоспособность, экспоненциальный закон распределения, испытания, число отказов, математическая модель, зерно.

В современном машиностроении одним из важнейших является вопрос обеспечения высокой надежности и работоспособности используемого сельскохозяйственного оборудования. В связи с этим в статье приведен сравнительный анализ серийно выпускаемой зерноочистительной машины МС-4,5 (г. Воронеж, Российская Федерация), только по индивидуальному заказу машины СМ-0,15 с традиционным и модернизированным электроприводом (на базе линейного асинхронного электродвигателя). Исследования проведены для подтверждения работоспособности и достоверности разработанной математической модели вероятности безотказной работы элементов зерноочистительной машины (далее – ЗМ), созданной с целью раскрытия закономерностей отказов при работе линейного электропривода ЗМ и повышения надёжности ЗМ в целом. Исследование модели надёжности ЗМ проходи-

ло по предложенной методике, состоящей из 4 этапов. Сбор и обработка наблюдений об отказах элементов ЗМ для сравнительного анализа осуществлялись эмпирическим методом на реальном образце в условиях сельскохозяйственного производства на предприятии ООО «Золотое руно» Дуванского района Республики Башкортостан. Для выявления эффективности работы ЗМ с линейным электроприводом проведены исследования основных энергетических и технико-экономических показателей. По результатам экспериментальных исследований с помощью Matlab (Simulink) построена теоретическая модель распределения времени безотказной работы ЗМ. На её основе выявлены параметры надёжности и определены способы её повышения. Анализ разработанной (полученной) математической модели и экспериментальных данных показал её работоспособность. Математическая модель дала возможность выявлять слабые места ЗМ, получая данные о реальной ситуации в заданный период времени, что позволяет сократить время проведения экспериментов при разработке новых линейных электроприводов и модернизации существующих ЗМ.

Keywords: *reliability, linear electric drive, trouble-free operation, performance, exponential distribution law, tests, number of failures, mathematical model, grain.*

In modern mechanical engineering, one of the most important is the issue of ensuring high reliability and performance of agricultural equipment used. In this regard, this paper compares a commercially available grain cleaning plant MS-4.5 (Voronezh, Russian Federation) and the SM-0.15 plant produced only on an individual order with a conventional and modernized electric drive (based on a linear asynchronous electric motor). The studies were carried out to confirm the operability and reliability of the developed mathematical model of the probability of failure-free operation of the elements of a grain cleaning plant (hereinafter referred to as GCP) designed in order to reveal the patterns of failures during the operation of a linear electric drive of the GCP and to increase the reliability of the GCP in general. The study of the GCP reliability model was carried out according to the proposed methodology consisting

of 4 stages. The collection and processing of the data on failures of the GCP elements for comparative analysis was carried out by the empirical method on a workable specimen under agricultural production conditions at the enterprise of the OOO "Zolotoe runo" of the Duvanskiy District of the Republic of Bashkortostan. To reveal the efficiency of the GCP with a linear electric drive, studies of the main energy and technical and economic indices were carried out. Based on the results of experimental studies with the help of Matlab (Simulink), a theoretical model of the distribution of the GCP failure-free operation was built and, on its basis, reliability parameters were identified and ways to improve it were determined. The analysis of the developed (obtained) mathematical model and experimental data showed its efficiency. The mathematical model made it possible to identify the shortcomings of the GCP by obtaining data on the real situation in a given period of time which made it possible to reduce the time for conducting experiments in the development of new linear electric drives and the modernization of existing GCP.

Фефелова Светлана Валерьевна, ассистент, ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, г. Уфа, Российская Федерация, e-mail: www.Svet1k15@mail.ru.

Туктаров Марат Фанисович, к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, г. Уфа, Российская Федерация, e-mail: Marat.TukZar@yandex.ru.

Fefelova Svetlana Valerevna, Asst., Bashkir State Agricultural University, Ufa, Russian Federation, e-mail: www.Svet1k15@mail.ru.

Tuktarov Marat Fanisovich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Bashkir State Agricultural University, Ufa, Russian Federation, e-mail: Marat.TukZar@yandex.ru.

Введение

В настоящее время отечественные зерно- и семяочистительные машины в производственных условиях имеют невысокую эффективность технологического процесса и низкую эксплуатационную надежность [1], что обуславливает постоянный научный поиск и разработку технических решений, направленных на совершенствование конструкций основных рабочих органов данных ЗМ. Результатом проведенных теоретических и экспериментальных исследований является ряд технических решений, направленных на повышение эффективности технологического процесса ЗМ [2]. Одними из таких исследований являются исследования, которые проводились на зерноочистительной машине СМ-0,15 [5].

В целях увеличения эксплуатационной надежности на машине СМ-0,15 взамен классического привода решётного стана был установлен линейный электропривод решётного стана (далее – ЛЭП РС), и далее построена математическая модель вероятности безотказной работы элементов ЗМ [3]:

$$P_A = 1 - \int_{0_1}^t \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2}} \exp - \left(\frac{t - \bar{t}}{2\sigma_t^2} \right)^2 dt \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot a .$$

где k_1, k_2, k_3, k_4 – поправочные коэффициенты в зависимости от воздействия механических факторов, влажности и температуры, давления воздуха;

$a (T \cdot k_H)$ – поправочный коэффициент в зависимости от температуры поверхности элемента (T) и коэффициента нагрузки (k_H);

t – текущее значение времени в масштабе задаваемого параметра;

\bar{t} – математическое ожидание наработки до отказа;

σ_t – среднее квадратичное отклонение наработки до отказа;

σ_0 – начальное значение вероятности отказов.

Данная модель позволяет:

- упростить разработку структурных схем надежности ЗМ, выполняя вычислительный эксперимент по анализу и оценке эффективности

предлагаемых мероприятий по повышению их надежности;

- осуществлять построение графиков работоспособности элементов ЛЭП РС ЗМ в программе Matlab (Simulink).

Непосредственное создание модели и результаты моделирования в графическом виде в Matlab (Simulink) представлены в [4]. Исследование модели вероятности безотказной работы ЛЭП РС ЗМ проведены в [5]. Основным результатом проведённых исследований является полученная вероятность безотказной работы ЗМ с ЛЭП РС, составляющая значение до 0,57 (57%) [5].

Объект и методы исследования

Для дальнейшего подтверждения работоспособности и достоверности полученной модели (1) было решено согласно ГОСТ Р 27.607-2013 провести исследования на серийно выпускаемой машине МС-4,5. Основные технические характеристики МС-4,5 [6]:

- номинальная производительность за час (на пшенице с объемной массой 760 г/л при влажности до 16% с содержанием отхода до 5%) – не менее 4,5 т/ч;

- установленная мощность – 5,2 кВт (электродвигатель воздушной части 4А112МА6УЗ – 3,0 кВт; электродвигатели РС и триеров 4А90L4УПУХЛ1 – 2,2 кВт).

Данная машина обладает высокой эффективностью работы, но при этом имеет типичные для данного типа машин недостатки [7]: наличие жестких кинематических связей в приводе РС, большое число передаточных механизмов и изнашивающихся поверхностей, низкая ориентирующая способность зернового материала на решетных станах ЗМ с прямолинейными колебаниями, а также высокие динамические нагрузки.

В связи с вышесказанным можно сделать вывод о том, что для машины МС-4,5 (точно как и для других ЗМ подобного типа) актуальным является замена традиционного привода на ЛЭП, построенный на базе линейного асинхронного электродвигателя (далее – ЛАД), техническая реализация которого представлена в работах [4, 5].

Было предложено провести исследования модели надежности ЗМ по методике, состоящей из 4 этапов:

1-й этап. Выдвижение гипотезы о законе распределения времени безотказной работы исследуемого объекта [7].

2-й этап. Построение модели надёжности одним из методов компьютерного моделирования, что подробно описано в [5] с использованием программ Matlab (приложение Simulink) и Microsoft Excel.

3-й этап. Проведение исследования полученной модели на адекватность, что было осуществлено различными экспериментами [5].

4-й этап. Сравнительный анализ линейных электроприводов 2 модернизированных ЗМ (СМ-0,15 и МС-4,5) с установленными ЛЭП РС.

С учетом того, что этапы № 1-3 рассмотрены в ранее опубликованных работах [4, 5], то предлагается в данной статье рассмотреть только 4-й этап.

Экспериментальная часть

Для проведения сравнительного анализа осуществлены сбор и обработка наблюдений об отказах элементов ЛЭП РС ЗМ и анализ причин, вызвавших эти отказы, на натурном (реальном) образце эмпирическим методом (путем наблюдений) в условиях сельскохозяйственного производства на предприятиях:

- ООО «Золотое руно» Дуванского района Республики Башкортостан на зерноочистительных машинах МС-4,5;

- семеноводческое хозяйство КФХ Шаяхметов А.С. Хайбуллинского района Республики Башкортостан на зерноочистительных машинах СМ-0,15.

Планирование эксперимента позволило снизить число необходимых испытаний, установив разумный план и условия проведения исследований [1].

Результаты исследований и их обсуждения

По журналу учёта работы ЗМ обеих марок работали в среднем по 8 ч в сутки в течение 4 мес., в год общая продолжительность работы составила 960 ч. При среднем сроке эксплуатации ЗМ, равном 3 годам (сезонам), общая продолжительность работы составила порядка 2880 ч у МС-4,5 (за период с 2020 по 2022 гг.) (рис. 1 а), у СМ-0,15 – за период с 2019 по 2021 гг. (рис. 1 б).

За данный период работы из 57 элементов машины МС-4,5 только у 10 её элементов произошли отказы (при этом их общее число соста-

вило 43 отказа), у машины СМ-0,15 из 46 элементов у 9 элементов произошло 38 отказов.

В связи с заменой традиционного привода на ЛЭП проведены экспериментальные исследования энергетических и технико-экономических показателей ЗМ (в частности, потребляемая ЛАД мощность P и производительность Q), по результатам которых построена зависимость $P=f(Q)$ (рис. 2).

Зависимость $P=f(Q)$ позволяет оценить требуемую мощность ЛАД для проектируемого ЛЭП

решётного стана ЗМ. Согласно зависимости $P=f(Q)$ при потребляемой мощности МС-4,5 с ЛАД $P=2,7$ кВт производительность составила $Q=4720$ кг/ч по пшенице ($Q=4560$ кг/ч – рожь) при заводской производительности серийной машины МС-4,5, равной $Q=4500$ кг/ч. (рис. 2 а). У машины СМ-0,15 с ЛАД, мощностью $P=1,2$ кВт, производительность составила $Q=198$ кг/ч по пшенице ($Q=150$ кг/ч – рожь) при производительности серийной машины СМ-0,15 – $Q=200$ кг/ч (рис. 2 б).

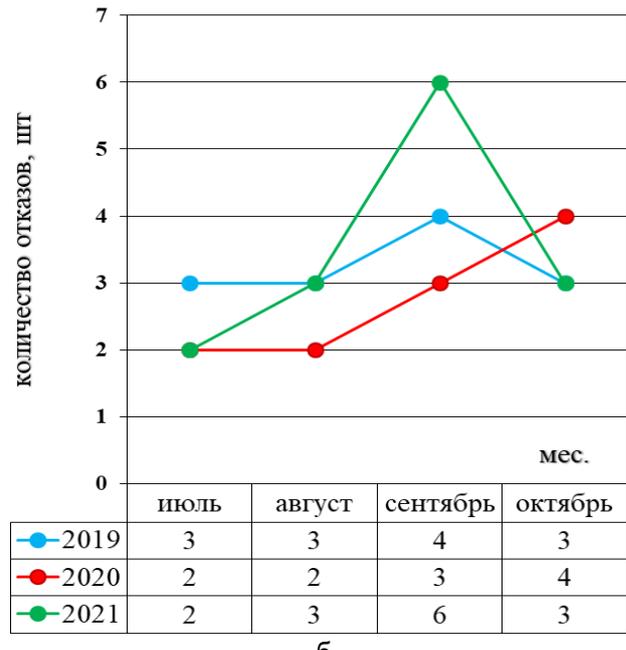
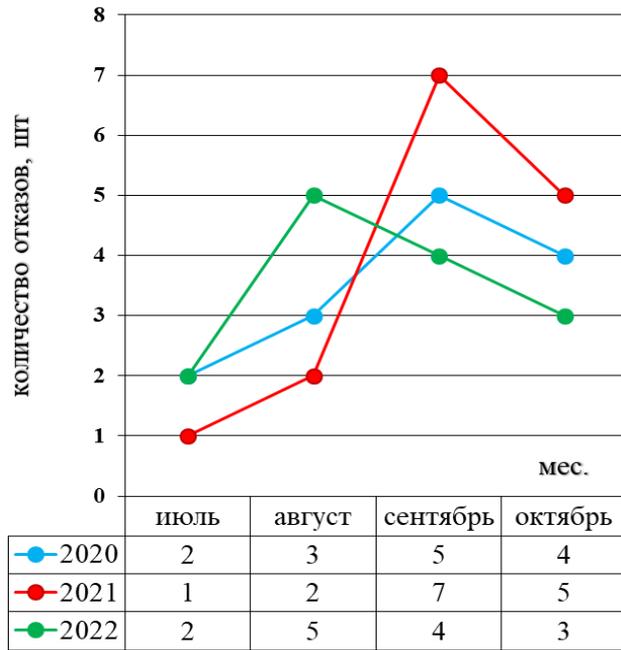


Рис. 1. Отказы машин:
а – МС-4,5 – за период с 2020 по 2022 гг.; б – СМ-0,15 – за период с 2019 по 2021 гг.

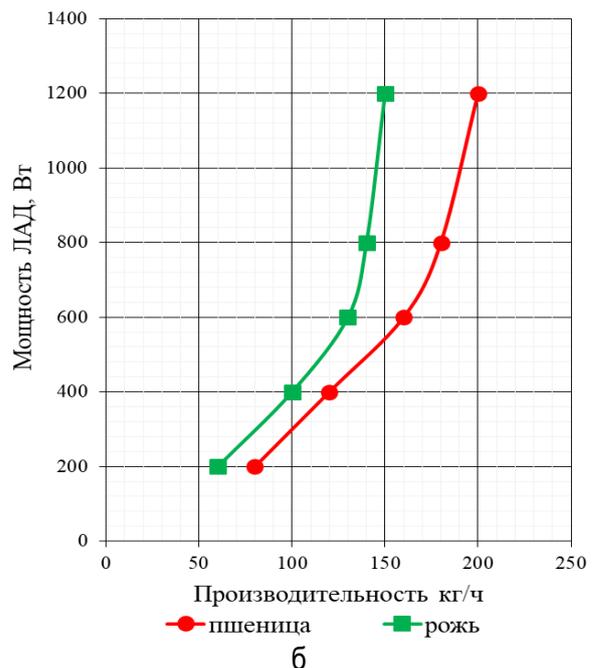
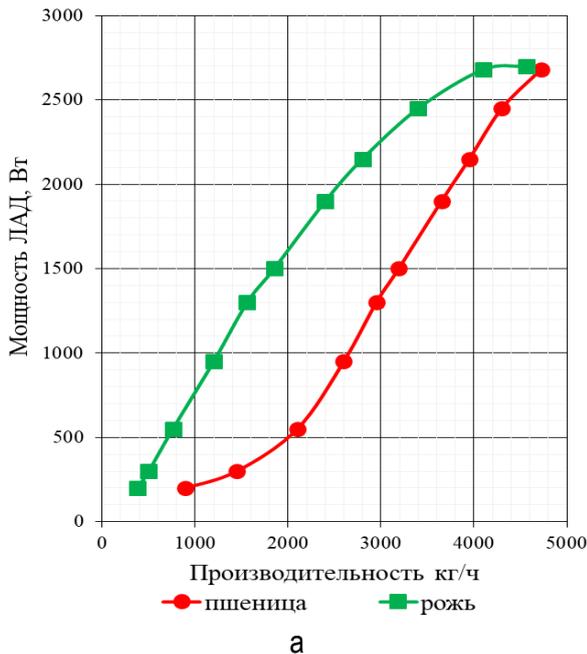


Рис. 2. Зависимость мощности ЛАД от производительности сеячистительной машины $P=f(Q)$

Полученные данные позволяют построить с помощью Matlab (приложение Simulink) математическую модель распределения времени безотказной работы 3М МС-4,5 с ЛЭП РС, представленной на рисунке 3 а. По результатам проведенных теоретических исследований выявлены уязвимые места и процент вероятности работоспособного состояния элементов МС-4,5 P(t):

упругие элементы (61%), подвеска (64%) и ролик подпружиненный (62,0%); у СМ-0,15 – упругие элементы (57%), подвеска (63%) и ролик подпружиненный (63,5%). Самая высокая вероятность работоспособного состояния составляет у машины МС-4,5 у индуктора ЛАД (73,8%) и привода РС (71,3%); у машины СМ-0,15 – у привода РС (72,7%) и индуктора ЛАД (68%) (рис. 3 б, в).

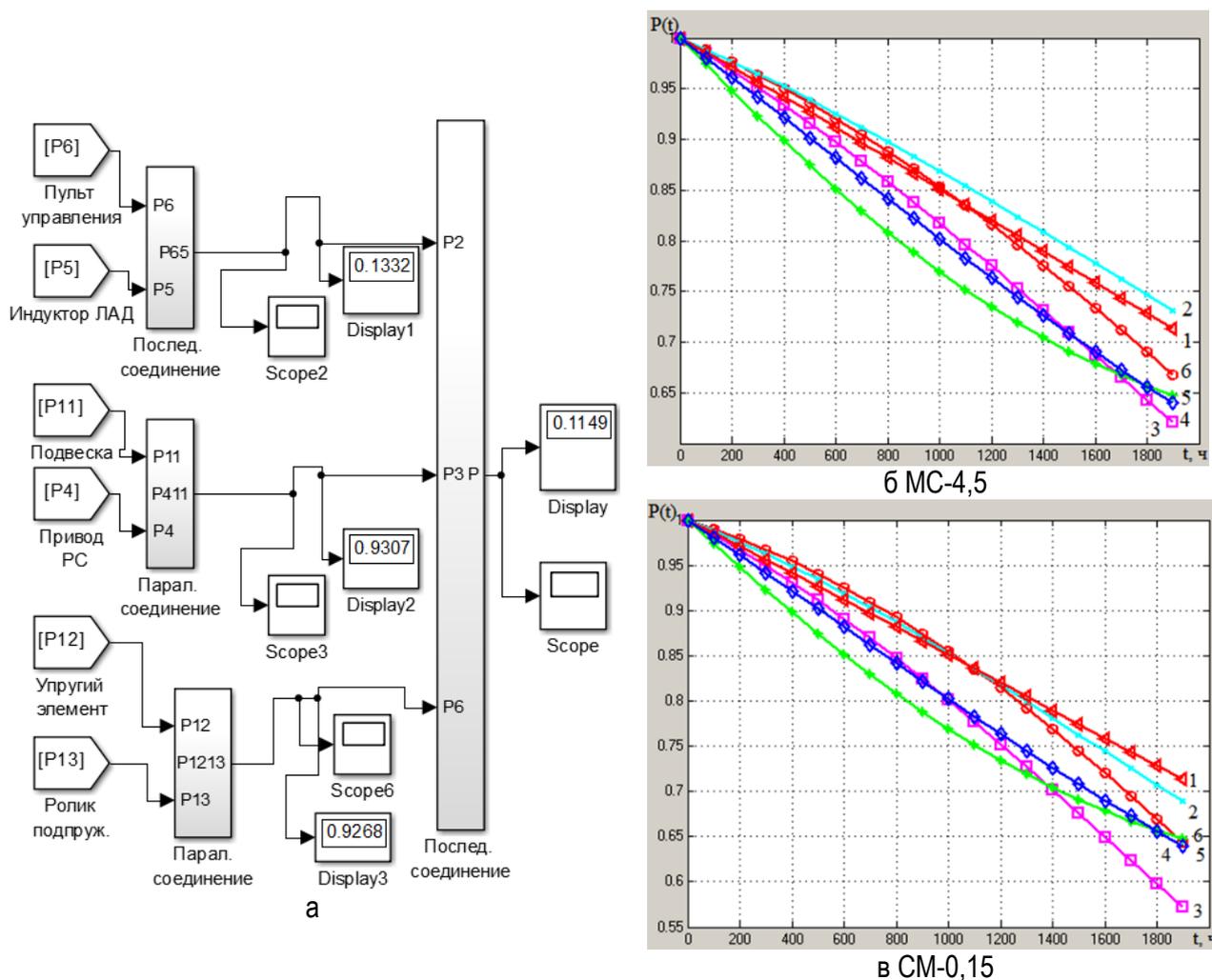


Рис. 3. Результат моделирования:

а – основное окно математической модели надежности 3М с ЛЭП РС в среде объектно-визуального моделирования Matlab (Simulink); б, в – вероятности работоспособного состояния основных элементов 3М: 1 – привод решетчатого стана, 2 – индуктор ЛАД, 3 – упругий элемент (винтовая пружина), 4 – подвеска, 5 – ролик подпружиненный, 6 – пульт управления

Вывод

Проведенный сравнительный анализ разработанных ЛЭП зерноочистительных машин СМ-0,15 и МС-4,5 (серийно выпускаемая) показал факт того, что предложенная математическая модель (1) является работоспособной и отражающей реальные данные. Проведенный анализ результатов также позволил выявить

уязвимые места и процент вероятности работоспособного состояния элементов МС-4,5 P(t): упругие элементы (61%), подвеска (64 %) и ролик подпружиненный (62,0%); у СМ-0,15 – упругие элементы (57%), подвеска (63%) и ролик подпружиненный (63,5%). Самая высокая вероятность работоспособного состояния составляет у машины МС-4,5 у индуктора ЛАД (73,8%) и

привода РС (71,3%); у машины СМ-0,15 – у привода РС (72,7%) и индуктора ЛАД (68%). Полученная математическая модель дала возможность выявлять слабые места ЗМ, получая данные о реальной ситуации в заданный период времени, что упрощает научно-исследовательскую работу и сокращает время проведения экспериментов при разработке новых ЛЭП и модернизации существующих ЗМ.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 8.010-2013. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Государственная система обеспечения единства измерений: введен от 01.03.2015. – Москва: Стандартинформ, 2019. – 14 с. – Текст: непосредственный.

2. Комаров, В. А. Исследование предприятий технического сервиса для обеспечения показателей надежности машин (на примере агропромышленного комплекса Республики Мордовия) / В. А. Комаров. – Текст: непосредственный // Вестник Мордовского университета. – 2018. – Т. 28, № 2. – С. 222-238. – DOI 10.15507/0236-2910.028.201802.222-238. – EDN XREEHB.

3. Кривель С. М. Анализ структурной схемы надёжности технических систем с использованием Simulink / С. М. Кривель. – Текст: непосредственный // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22, № 6. – С. 85-97.

4. Туктаров, М. Ф. Эксплуатационная оценка надежности линейного электропривода зерноочистительной машины / М. Ф. Туктаров, С. В. Фефелова, В. Г. Байназаров. – Текст: непосредственный // Материалы научно-практической конференции в рамках Весеннего форума ЖКХ и строительства. – 2019. – С. 105-109.

5. Фефелова, С. В. Исследование вибрации на вероятность безотказной работы линейного электропривода решетного стана зерноочистительной машины / С. В. Фефелова, М. Ф. Туктаров. – Текст: непосредственный // Уральский научный вестник. – 2022. – Т. 8, № 2. – С. 85-88.

6. Машина вторичной очистки семян самопередвижная МС-4,5 / Технические данные МС-4,5. – URL: <https://vselmash.nt-rt.ru/> (дата обращения: 15.03.2023). – Текст: электронный.

7. Paman Ujang, Uchida Susumu, Inaba Shigeki. (2011). Operators' Capability and Facilities Availability for Repair and Maintenance of Small Tractors in Riau Province, Indonesia: A Case Study. *Journal of Agricultural Science*. 4. DOI: 10.5539/jas.v4n3p71.

References

1. GOST R 8.010-2013. Priamye izmereniia s mnogokratnymi nabliudeniiami. Metody obrabotki rezultatov nabliudeniia. Gosudarstvennaia sistema obespecheniia edinstva izmerenii: vveden ot 01.03.2015. – Moskva: Standartinform, 2019. – 14 s.

2. Komarov, V.A. Issledovanie predpriatii tekhnicheskogo servisa dlia obespecheniia pokazatelei nadezhnosti mashin (na primere agropromyshlennogo kompleksa Respubliki Mordoviia) / V.A. Komarov // Vestnik Mordovskogo universiteta. – 2018. – T. 28, No. 2. – S. 222-238. – DOI 10.15507/0236-2910.028.201802.222-238. – EDN XREEHB.

3. Krivel S.M. Analiz strukturnoi skhemy nadezhnosti tekhnicheskikh sistem s ispolzovaniem Simulink // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2018. – T. 22. No. 6. – S. 85-97.

4. Tuktarov, M.F. Ekspluatatsionnaia otsenka nadezhnosti lineinogo elektroprivoda zernoochistitelnoi mashiny / M.F. Tuktarov, S.V. Fefelova, V.G. Bainazarov // Materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii v ramkakh Vesennego foruma ZhKKh i stroitelstva. – 2019. – S. 105-109.

5. Fefelova, S.V. Issledovanie vibratsii na veroiatnost bezotkaznoi raboty lineinogo elektroprivoda reshetnogo stana zernoochistitelnoi mashiny / S.V. Fefelova, M.F. Tuktarov // Uralskii nauchnyi vestnik. – 2022. – T. 8, No. 2. – S. 85-88.

6. Mashina vtorichnoi ochistki semian samopredvizhnaia MS-4,5 [Elektronnyi resurs] / Tekhnicheskie dannye MS-4,5 – URL: <https://vselmash.nt-rt.ru/> (data obrashcheniia 15.03.2023).

7. Paman Ujang, Uchida Susumu, Inaba Shigeki. (2011). Operators' Capability and Facilities Availability for Repair and Maintenance of Small Tractors in Riau Province, Indonesia: A Case Study. *Journal of Agricultural Science*. 4. DOI: 10.5539/jas.v4n3p71.

