

МАШИНОСТРОЕНИЕ / MECHANICAL ENGINEERING

УДК 631.3.072

DOI: 10.15507/2658-4123.030.202001.008-020



Надежность работы машинно-тракторного агрегата

С. Н. Шуханов^{1*}, А. В. Кузьмин¹, П. А. Болоев²

¹ФГБОУ ВО «Иркутский государственный аграрный университет имени А. А. Ежевского» (пос. Молодёжный, Иркутская обл., Россия)

²ФГБОУ ВО «Бурятский государственный университет имени Доржи Банзарова» (г. Улан-Удэ, Россия)

*shuhanov56@mail.ru

Введение. Развитие агропромышленного комплекса невозможно без создания инновационных технических средств и технологий. Ключевую роль при техническом обеспечении сельскохозяйственного производства играют машинно-тракторные агрегаты. Одной из их важнейших эксплуатационных характеристик является надежность, то есть способность выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в необходимых пределах.

Материалы и методы. Объект исследования – процессы надежности работы машинно-тракторных агрегатов. При проведении исследований использовались методы математического моделирования. Общие законы применялись для частных случаев с учетом прогнозирования изменения параметров во времени. Аналитическое описание процессов работы надежности работы машинно-тракторного агрегата опиралось на стационарные случайные и корреляционные функции. Для построения математических моделей надежности использовались обобщенные закономерности с использованием результатов испытаний предшественника (аналога). Оптимальная надежность функционирования машинно-тракторного агрегата определялась на основе математической модели ресурса объекта.

Результаты исследования. Получены аналитические зависимости прогнозирования изменения параметров во времени процессов надежности работы машинно-тракторных агрегатов. Разработаны методы построения математических моделей надежности. Определены условия, влияющие на функционирование объекта исследований.

Обсуждение и заключение. Проведенный анализ и синтез исследований в этой области науки и полученные математические модели показывают, что для достижения высоких результатов необходимо уменьшать дисперсии факторов, влияющих на надежность работы машинно-тракторных агрегатов.

Ключевые слова: надежность работы, машинно-тракторный агрегат, математическое моделирование, оптимизация параметров, трактор

Для цитирования: Шуханов, С. Н. Надежность работы машинно-тракторного агрегата / С. Н. Шуханов, А. В. Кузьмин, П. А. Болоев. – DOI: 10.15507/2658-4123.030.202001.008-020 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 1. – С. 8–20.

© Шуханов С. Н., Кузьмин А. В., Болоев П. А., 2020



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

Reliability of Machine-Tractor Aggregates Operation

S. N. Shukhanov^{a*}, A. V. Kuzmin^a, P. A. Boloyev^b

^a *Irkutsk State Agrarian University named after A. A. Ezhevsky (Molodezhnyy, Irkutsk Oblast, Russia)*

^b *Buryat State University (Ulan-Ude, Russia)*

*shuhanov56@mail.ru

Introduction. The development of the agro-industrial complex is impossible without creating innovative techniques and technologies. The key role in technical support of agricultural production processes is played by machine-tractor aggregates. One of their most important operational characteristics is reliability, i.e. the ability to perform specified functions, keeping over time the values of the operational indicators within the required limits.

Materials and Methods. The object of the study is the reliability of machine-tractor aggregates. The methods of mathematical modeling were used for the study. The general patterns were used for special cases, taking into account the prediction of changes in parameters over time. The analytical description of machine-tractor aggregate operation reliability was based on stationary random and correlation functions. Generalized patterns were used to construct mathematical reliability models using the results of predecessor (analogue) tests. Optimal reliability of the machine-tractor aggregate operation was determined on the basis of the mathematical model of object resource.

Results. There are obtained analytical dependences for the prediction of changes in reliability parameters of machine-tractor aggregate operation over time. The methods for creating reliability mathematical models are developed. Conditions affecting the functioning of the research object are determined.

Discussion and Conclusion. The analysis and synthesis of research in this science field and the obtained mathematical models show that to achieve high results it is necessary to decrease the variance of factors affecting the reliability of machine-tractor aggregates.

Keywords: operation reliability, machine-tractor aggregate, mathematical modeling, optimization of parameters, tractor

For citation: Shukhanov S.N., Kuzmin A.V., Boloyev P.A. Reliability of Machine-Tractor Aggregates Operation. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(1):8-20. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202001.008-020>

Введение

Функционирование сельскохозяйственного производства на современном этапе развития предполагает как совершенствование существующих технических средств и технологий [1–3], так и создание новых, работающих на инновационных принципах [4–6]. Одним из наиболее актуальных вопросов в этом ряду проблем является успешная реализация программы научно-технического обеспечения агропромышленного комплекса [7–9], в том числе его автотракторного сопровождения [10–12]. Значительный объем работ при механизации сельскохозяйственных процессов выполняется с помощью ма-

шинно-тракторных агрегатов (МТА). Одной из важнейших эксплуатационных характеристик является их надежность, то есть способность выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах. Поэтому повышение эффективности механизированных процессов в сельском хозяйстве является важной научно-практической задачей [13].

Обзор литературы

Вопросами функционирования МТА занимался ряд ученых, например, А. Н. Важенин, Б. А. Арютов, А. В. Пасин, Р. В. Кошелев, А. И. Новожиллов, С. А. Соколов, А. В. Бакла-

нов и Н. Н. Малыгина. Так, в работе А. Н. Важенина для улучшения показателей качества была разработана динамическая модель машинно-тракторного агрегата в различных условиях функционирования производственных процессов [14]. Труд А. В. Пасина и соавторов посвящен обоснованию оптимальной взаимосвязи сезонного расписания и темпов выполнения полевых механизированных работ [15]. Б. А. Арютов и коллеги в ряде исследований обосновали и адаптировали динамическую модель МТА, приспособленную к изменяющимся условиям функционирования технологических процессов в растениеводстве [16; 17]. А. Н. Важенин и коллектив ученых разработали методы повышения эффективности механизированных производственных процессов по условиям их работы в растениеводстве [18–21]. С. Н. Шкрабак в своем исследовании рассматривал надежность технических средств в технологических звеньях поточных линий на заготовке сенажа и силоса, то есть в достаточно узконаправленном аспекте [22]. Решением проблем повышения эффективности эксплуатации тракторов путем обеспечения их работоспособности для различных условий аграрного производства занимался И. Г. Галиев [23]. Однако все выкладки в его исследованиях выполнены применительно для хозяйств Республики Татарстан.

Среди наиболее значимых в этой области стоит отметить исследования А. И. Новожилова. В одной из статей он приводит разработанные им модели производственного процесса, технологического комплекса по внесению удобрений, а также МТА [24]. В коллективном труде «Статистическая оценка надежности машинно-тракторных агрегатов» рассчитан коэффициент готовности МТА при работе в условиях трех агропочвенных районов Нижегородской области [25]. Получен уточненный коэффициент технической готовности при работе МТА.

Несмотря на значимость перечисленных работ, вопрос надежности машинно-тракторного агрегата в полной мере не рассматривался, поэтому возникла необходимость в решении этой задачи.

Материалы и методы

Объект исследования – процессы надежности работы МТА. При проведении исследований использовались методы математического моделирования. Общие законы применялись для частных случаев с учетом прогнозирования изменения параметров во времени. При аналитическом описании процессов работы надежности МТА необходимо было опираться на стационарные случайные и корреляционные функции. Для построения математических моделей надежности применялись обобщенные закономерности с использованием результатов испытаний предшественника (аналога). Оптимальная надежность функционирования машинно-тракторного агрегата определялась на основе математической модели ресурса объекта.

Результаты исследования

Прогнозирование изменения параметров во времени

Задача прогнозирования параметров процесса изменения технического состояния изделий при эксплуатации состоит в определении их числовых характеристик для будущих моментов времени по результатам сокращенных или незавершенных испытаний [26].

При выборе и обосновании математической модели следует исходить, прежде всего, из физической сущности явлений, приводящих к изменению характеров изделий в процессе эксплуатации. Наиболее часто используемой моделью для описания процессов скорости изменения параметров является стационарная случайная функция:

$$z(t) = m_z(t) + z(t), \quad (1)$$

где $m_z(t)$ – математическое ожидание функции $z(t)$; $i(t)$ – центрированный случайный процесс.

Наглядным примером такого процесса является процесс приращений величин цикловых подач топлива насосом высокого давления. Опыт испытаний показывает, что процесс, характеризующий случайную составляющую скорости изменения параметров многих видов изделий, в подавляющем большинстве случаев является стационарным нормально распределенным случайным процессом с экспоненциальной или экспоненциально-колебательной корреляционной функцией.

Стационарными случайными функциями называются такие, вероятностные характеристики которых не изменяются во времени. К ним, прежде всего, относятся математическое ожидание и корреляционная функция.

Условия стационарности случайной функции можно записать в виде:

$$m_z(t) = \text{const};$$

$$K_z(t, t + \tau) = K_z(\tau).$$

При $\tau = 0$ значение корреляционной функции представляет собой дисперсию в сечении случайной функции:

$$K_z(\tau) = D_z(t) = \text{const}.$$

Нормированной корреляционной функцией случайного процесса является функция:

$$k_z(\tau) = K_z(\tau) / [D_z(\tau)].$$

Выражение для нормированной экспоненциальной корреляционной функции стационарного случайного процесса можно записать в виде:

$$k_z(\tau) = e^{-a[\tau]}. \quad (2)$$

Оценка математического ожидания случайного процесса по результатам за-

меров приращений параметров изделий за период испытаний производится по формуле:

$$\hat{M}[\Delta X(t)] = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^1 \Delta x_{ji}, \quad (3)$$

где N – общее число замеров величин Δx_{ji} ; 1 в эксперименте; 1 – число испытываемых изделий; m – число замеров параметров i -го изделия.

Дисперсия случайного процесса находится из соотношения:

$$\hat{D}[\Delta X(t)] = \frac{1}{N-1} \left\{ \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^1 \Delta x_{ji}^2 - \frac{1}{N} \left[\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^1 \Delta x_{ji} \right]^2 \right\}.$$

Оценка значений корреляционной функции случайного процесса производится по формуле:

$$\hat{K}_{\Delta x}(t, t') = \frac{1}{mlm-1} \left\{ \sum_{i=1}^{mlm} \Delta x_i(t) \Delta x_i(t') - \frac{1}{mlm} \left[\sum_{m=1}^{ml} \Delta x_i(t) \sum_{i=1}^{ml} \Delta x_i(t') \right] \right\}. \quad (4)$$

Рассчитанные таким образом значения корреляционной функции образуют матрицу:

$$|K_{ij}| = \begin{vmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} & \dots & K_{m1} \\ K_{32} & K_{22} & K_{23} & K_{24} & \dots & K_{m2} \\ K_{53} & K_{43} & K_{33} & K_{34} & \dots & K_{m3} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{m1} & K_{m2} & K_{m3} & K_{m4} & \dots & K_{mm} \end{vmatrix}, \quad (5)$$

где $K_{ij} = K_{\Delta x}(t, t') = M[\Delta x(t)\Delta x(t')]$ – корреляционный момент случайных величин $\Delta x(t)$ и $\Delta x(t')$.

Корреляционная матрица симметрична относительно главной диагонали, поэтому на практике обычно заполняют лишь половину матрицы:

$$|K_{ij}| = \begin{vmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} & \dots & K_{m1} \\ & K_{22} & K_{23} & K_{24} & \dots & K_{m2} \\ & & K_{33} & K_{34} & \dots & K_{m3} \\ & & & \dots & \dots & \dots \\ & & & & & K_{mm} \end{vmatrix}.$$

По главной диагонали этой корреляционной матрицы стоят дисперсии случайных величин. В ряде случаев возникает необходимость вычисления нормированной корреляционной матрицы системы m случайных величин.

$$|K_{ij}| = \begin{vmatrix} 1 & K_{12} & K_{13} & K_{14} & \dots & K_{m1} \\ & 1 & K_{23} & K_{24} & \dots & K_{m2} \\ & & 1 & K_{34} & \dots & K_{m3} \\ & & & \dots & \dots & \dots \\ & & & & & K_{mm} \end{vmatrix}, \quad (6)$$

где $k = K_{ij} / (\sigma_i \sigma_j)$ – коэффициент корреляции случайных величин функции:

$$\Delta x(t), \Delta x(t').$$

Для стационарной случайной функции $\Delta x(t)$ матрица записывается в виде:

$$|K_{ij}| = \begin{vmatrix} 1 & K_{\Delta x1} & K_{\Delta x2} & K_{\Delta x3} & \dots & K_{\Delta xm} \\ & 1 & K_{\Delta x1} & K_{\Delta x2} & \dots & K_{\Delta x-1} \\ & & 1 & K_{\Delta x1} & \dots & K_{\Delta x-2} \\ & & & \dots & \dots & \dots \\ & & & & & 1 \end{vmatrix},$$

где $K_{\Delta x1}, K_{\Delta x2}, \dots, K_{\Delta xm}$ – коэффициент корреляции случайных величин функции $\Delta x(t)$ для дискретных:

$$\tau_1 = \Delta t, \tau_2 = 2\Delta t, \tau_3 = 3\Delta t, \tau_m = m\Delta t.$$

Если нормированная корреляционная функция случайного процесса представляет собой экспоненту:

$$K_{\Delta x}(\tau) = e^{-a\tau},$$

то значение α при известных корреляционных функциях находится из соотношения:

$$\alpha = \ln k_{\Delta x}(\tau) / \tau.$$

Пример. При испытании 14 топливных насосов замерены приращения величин цикловых подач топлива, интервалы наработки $\Delta t_1 = t_1 - t_0 = \Delta t_2 = t_2 - t_1 = \dots = 1000$ м/ч отражены в таблице 1 [26].

Таблица 1
Table 1

Приращения величин цикловых подач топлива
Increments in cyclic fuel feeds

Интервал наработки / Operating time interval	Приращения (%) величин цикловых подач топлива Δx_{qy} образцов насосов / Increments (%) of values of cyclic fuel supply Δx_{qy} for pump sample													
Δt , м/ч / Δt , m/h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0–1000	+0,7	–1,8	+0,8	+0,3	+1,2	–0,4	+0,3	–1,9	+2,2	+2,5	+1,4	+1,6	0,0	0,0
1000–2000	–0,7	–1,6	+1,0	+1,6	+0,6	–0,3	+0,5	+0,5	+0,4	+1,9	+1,2	–0,7	+1,2	–0,7

Требуется определить числовые характеристики случайного процесса, исходя из гипотезы его стационарности.

Решение. Оценку математического ожидания находим, подставляя табличные значения величин в формулу (2):

$$m_{\Delta x} = 11,8/28 = 0,4214.$$

Для оценки дисперсии процесса воспользуемся формулой:

$$D_{\Delta x} = 1/(28 - 1)[40,56 - (1/28)11,8^2] = 1,318.$$

Величина среднеквадратического отклонения определяется так:

$$\sigma_{\Delta x} = \sqrt{1,318} = 1,148.$$

Значение корреляционной функции для $\tau = 1000$ м/ч рассчитывается по формуле:

$$K_{\Delta x}(t, t') = (1/14 \cdot 2 - 14 - 1) \times \\ \times [9,9 - (1/14 \cdot 2 - 14) \cdot 6,9 \cdot 4,9] = 0,575.$$

Соответствующее значение нормированной корреляционной функции находим как частное:

$$K_{\Delta x}(\tau) = K_{\Delta x}(t, t') / D_{\Delta x} = 0,575 / 1,318 = 0,436.$$

Величина коэффициента в формуле (5) находится из соотношения (6):

$$a = \ln 0,436/1000 = -0,83 \cdot 10^{-3}.$$

Таким образом, выражение для корреляционной функции рассматриваемого процесса можно записать в виде:

$$K_{\Delta x}(\tau) = 1,318 \cdot e^{-0,83 \cdot 10^{-3} \tau}.$$

Полученные в результате расчета оценки моментных функций процесса приращений параметра для последующих расчетов удобно представить в виде ряда:

$$m_{\Delta x}(t) \quad D_{\Delta x}(t) \quad \sigma_{\Delta x}(t) \quad K_{\Delta x1} \quad K_{\Delta x2} \quad K_{\Delta x3} \quad K_{\Delta x4} \quad K_{\Delta x5} \\ 0,421 \quad 1,318 \quad 1,148 \quad 0,436 \quad 0,190 \quad 0,082 \quad 0,036 \quad 0,016.$$

Совокупность показателей $m_{\Delta x}$, $D_{\Delta x}$, $K_{\Delta x}(\tau)$ процесса с количественной стороны характеризует закономерности изнашивания и старения изделий и создает реальные возможности для прогнозирования моментных функций процессов изменения параметров аппаратуры в процессе эксплуатации.

Прогнозирование моментных функций $m_x(t)$, $D_x(t)$, $K_x(t, t')$ случайного процесса изменений параметра $x(t)$ может быть успешно выполнено на основе ранее полученных оценок этих параметров. Так, для непрерывных процессов прогнозируемые значения моментных функций находятся интегрированием выражений (1) и (2):

$$m_x(t_n) = \int_0^{t_n} m_{\Delta x}(t) dt, \quad (7)$$

$$D_x(t_n) = \int_0^{t_n} \int_0^{t_n} K_{\Delta x}(\tau) dt dt, \quad (8)$$

$$K_x(t_m, t_n) = \int_0^{t_n} \int_0^{t_n} K_{\Delta x}(\tau) dt dt. \quad (9)$$

Для дискретных процессов прогнозируемые значения математического ожидания случайной функции $x(t)$ определяются по формуле:

$$mx(tn) = m_{\Delta x} x(t)tn, \quad (10)$$

где t_n – время, для которого рассчитываются прогнозируемые характеристики процесса $x(t)$.

Дисперсия процесса $x(t)$ для прогнозируемых дискретных t_n определяется по известной корреляционной матрице (9) функции приращений параметра.

Учитывая, что:

$$D_x(t) = D \left[\sum_{i=1}^n \Delta x_i \right]. \quad (11)$$

Применяя теорему о дисперсии суммы случайных величин, получим следующие соотношения:

$$D_x(t) = D_{\Delta x}, \quad (12)$$

$$D_x(t_2) = D_{\Delta x} \Sigma \begin{vmatrix} 1 & k_{\Delta x1} \\ k_{\Delta x1} & 1 \end{vmatrix}, \quad (13)$$

$$D_x(t_3) = D_{\Delta x} \Sigma \begin{vmatrix} 1 & k_{\Delta x1} & k_{\Delta x2} \\ k_{\Delta x1} & 1 & k_{\Delta x1} \\ k_{\Delta x2} & k_{\Delta x1} & 1 \end{vmatrix}. \quad (14)$$

В общем виде формулу для определения дисперсии процесса изменения параметра во времени можно представить в виде:

$$D_x(t_n) = D_{\Delta x} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^{n-1} c_{kj}. \quad (15)$$

где $D_{\Delta x}$ – дисперсия функции приращений параметра во времени; c_k – элементы нормированной корреляционной матрицы функции приращений.

Аналогичным путем определяются все корреляционные моменты процесса $x(t_n)$. С учетом того, что:

$$x(t_n) = \sum_{i=1}^n \Delta x_i(t), \quad (16)$$

$$K_x(t_m, t_n) = M\{[x(t_m) - m_x(t_m) - m_x(t_n)][x(t_n) - m_x(t_n)]\}. \quad (17)$$

Ниже приведены расчетные формулы при определении первых 15 корреляционных моментов процесса для дискретных $t = 2000, 3000, \dots, 6000$ м/ч [26]:

1. $K_x(t_1, t_2) = D_{\Delta x}(1+k_1)$,
2. $K_x(t_1, t_3) = D_{\Delta x}(1+k_1+k_2)$,
- ...
4. $K_x(t_2, t_3) = D_{\Delta x}(2+3k_1+k_2)$,
5. $K_x(t_1, t_6) = D_{\Delta x}(1+k_1+\dots+k_5)$,
6. $K_x(t_2, t_3) = D_{\Delta x}(2+3k_1+k_2)$,

$$7. K_x(t_2, t_4) = D_{\Delta x}(2+3k_1+2k_2+k_3),$$

...

$$9. K_x(t_2, t_6) = D_{\Delta x}(2+3k_1+2k_2+2k_3+2k_4+k_5),$$

$$10. K_x(t_3, t_4) = D_{\Delta x}(3+5k_1+3k_2+k_3),$$

$$11. K_x(t_3, t_4) = D_{\Delta x}(3+5k_1+4k_2+2k_3+k_4),$$

$$12. K_x(t_3, t_5) = D_{\Delta x}(3+5k_1+4k_2+3k_3+2k_4+k_5),$$

$$13. K_x(t_4, t_5) = D_{\Delta x}(4+7k_1+5k_2+3k_3+k_4),$$

$$14. K_x(t_4, t_6) = D_{\Delta x}(4+7k_1+6k_2+4k_3+2k_4+k_5),$$

$$15. K_x(t_5, t_6) = D_{\Delta x}(5+9k_1+7k_2+5k_3+3k_4+k_5).$$

Методы построения математических моделей надежности

Известно, что скорость изнашивания пропорциональна мощности трения:

$$\gamma = aFv, \quad (18)$$

где a – коэффициент; F – сила трения; v – относительная скорость скольжения трущихся тел.

Для повышения эффективности математической модели надежности при прогнозировании необходимо при их построении привлекать обобщенные физические закономерности, определяющие процесс исчерпания ресурса.

Преимущества построения математических методов надежности состоят в том, что данные, используемые для расчета обобщенных закономерностей, могут быть реально оценены на этапе проектирования, и на их основе можно построить методику расчета надежности с использованием результатов испытаний предшественника (аналога).

Рассмотрим процесс механического изнашивания. Износ, отнесенный к одному циклу, записывается в виде [26]:

$$\gamma_1 = aA_1^{m_1} \text{ при } A_1 A_{10}, \quad (19)$$

где A_1 – работа трения за один цикл; m – показатель степени (определяется экспериментально); A_{10} – граничное значение работы трения за цикл.

Определим коэффициент a . Износ за n циклов:

$$U_n = \gamma n = aA_1^{m_1} n. \quad (20)$$

Введем предельный износ $U_{\text{пр}}$. Тогда мера повреждения:

$$D'_n = U / U_{\text{пр}} = aA^{m_1}n / U_{\text{пр}}. \quad (21)$$

Введем базу испытаний N'_0 и предельную работу трения A_{10} , которые следует определить экспериментально. Тогда при $D_n = 1$:

$$\begin{aligned} a / U_{\text{пр}} &= 1 / N'_0 A_{10}^{m_1} \\ D'_n &= A_{10}^{m_1} n / A_{10}^{m_1} N'_0. \end{aligned} \quad (22)$$

Под $n = N$ следует понимать число циклов, при котором достигается предельное состояние.

Оптимизация надежности

На основе математической модели ресурса объекта

$$t = \varphi(x_1, x_2, \dots) \quad (23)$$

определяем оптимальную надежность, которая обеспечивается минимальным отклонением параметров объекта от желаемого значения.

В качестве функции, характеризующей отклонение возможной надежности от желаемой, введем математическое ожидание квадрата разности показателей:

$$\delta^2 = M[(z_m - z)^2], \quad (24)$$

где z_m – желаемое значение показателя надежности; z – возможное его значение. Преобразуем выражение, введя среднее значение $z_{\text{ср}}$:

$$\delta^2 = M[(z_m - z)^2] = \dots = (z_m - z_{\text{ср}})^2 + D_z. \quad (25)$$

Пусть показатель надежности связан с факторами следующим выражением:

$$z = a_0 + a_1 z_1 + a_2 z_2 + a_3 z_3 + \dots \quad (26)$$

Тогда:

$$z_{\text{ср}} = a_0 + a_1 z_{\text{ср}1} + a_2 z_{\text{ср}2} + \dots, \quad (27)$$

$$D_z = a_1^2 D_{z1} + a_2^2 D_{z2} + \dots, \quad (28)$$

$$\delta^2 = [z_{\text{ср}} - (a_0 + a_1 z_{\text{ср}1} + \dots)]^2 + a_1^2 + D_{z1} + D_{z2} + \dots \quad (29)$$

Как видим, для достижения результатов необходимо уменьшать дисперсии факторов, влияющих на надежность работы машинно-тракторных агрегатов.

Обсуждение и заключение

Путем определения числовых характеристик по результатам испытаний решена задача прогнозирования параметров изменения технического состояния изделий при эксплуатации. При этом использовались стационарные случайные функции. В качестве примера приведены результаты испытания топливных насосов. Предложены методы получения аналитических зависимостей, описывающих собственно надежность. Эффективность математической модели надежности при прогнозировании можно повысить с помощью привлечения при их построении обобщенных физических закономерностей, определяющих процесс исчерпания ресурса. Для оптимизации надежности необходимо уменьшить дисперсии факторов, влияющих на надежность работы МТА.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Shuhanov, S. N.** Interaction Elements of Particles of Grain Lots with Air during the Work of Tape Thrower / S. N. Shuhanov // *Agrarian Scientific Journal*. – 2015. – Vol. 12. – Pp. 58–59.
2. **Samoilenko, D.** Improvement of Torque and Power Characteristics of V-Type Diesel Engine Applying New Design of Variable Geometry Turbocharger (VGT) / D. Samoilenko, A. Marchenko, H. M. Cho. – DOI 10.1007/s12206-017-0950-2 // *Journal of Mechanical Science and Technology*. – 2017. – Vol. 31, issue 10. – Pp. 5021–5027. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12206-017-0950-2#citeas> (дата обращения: 10.02.2020).

3. **Ovchinnikov, A. S.** Energy and Agrotechnical Indicators in the Testing of Machine-Tractor Units with Subsoiler / A. S. Ovchinnikov, A. S. Mezheva, A. E. Novikov [et al.] // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2017. – Vol. 12, issue 24. – Pp. 7150-7160. URL: http://www.arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2017/jeas_1217_6597.pdf (дата обращения: 10.02.2020).

4. **Бутенко, А. Ф.** К обоснованию эффективности использования комбинированного ленточно-го метателя зерна / А. Ф. Бутенко, А. В. Асатурян // *Международный технико-экономический журнал*. – 2018. – Вып. 1. – С. 80–86. URL: http://www.tite-journal.com/fileadmin/fail/tite-journal_1_2018/Butenko.pdf (дата обращения: 10.02.2020). – Рез. англ.

5. **Nuralin, B.** Constructive-Regime Parameters of Rotor-Brush Cleaner for Tuberous Foots Dry Cleaning / B. Nuralin, A. Bakushev, M. Janaliev [et al.] // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. – 2018. – Т. 40, № 2. – 113 p.

6. **Piven, V. V.** Determination of the Extent of Fraction in Air Separation of Grain Material / V. V. Piven. – DOI 10.1088/1742-6596/1059/1/012001 // *Journal of Physics Conference Series*. – 2018. – Vol. 1059, issue 1. – P. 012001. URL: https://www.researchgate.net/publication/326495712_Determination_of_the_Extent_of_Fraction_in_Air_Separation_of_Grain_Material (дата обращения: 10.02.2020).

7. **Алтухов, С. В.** Анализ гидродинамических характеристик распылителей форсунок ДВС / С. В. Алтухов, С. Н. Шуханов // *Тракторы и сельхозмашины*. – 2018. – № 3. – С. 3–6. URL: https://mospolytech.ru/storage/f033ab37c30201f73f142449d037028d/files/Traktory_i_selhozmashiny_No3_2018.pdf (дата обращения: 10.02.2020). – Рез. англ.

8. **Шуханов, С. Н.** Элементы взаимодействия зубчатых передач механических трансмиссий автотракторной техники / С. Н. Шуханов, А. Ю. Кузькин, В. В. Скutelный [и др.] // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. – 2018. – №1 (69). – С. 107–109. URL: https://orensau.ru/images/stories/docs/izvestia/2018/Izvestia_1_69.pdf (дата обращения: 10.02.2020).

9. **Druzyanova, V. P.** Mathematical Model of Biogas Treatment Process with a Zeolite Filter / V. P. Druzyanova, Y. Zh. Dondokov, O. M. Osmonov [et al.] // *International Journal of Civil Engineering and Technology*. – 2018. – Vol. 9, issue 9. – Pp. 280–288. URL: https://www.researchgate.net/publication/328272717_Mathematical_model_of_biogas_treatment_process_with_a_zeolite_filter (дата обращения: 10.02.2020).

10. **Болоев, П. А.** Экспериментальный стенд для исследования энергетической установки с биогазовым ДВС / П. А. Болоев, В. П. Друзыанова, Н. В. Петров. – DOI 10.31992/0321-4443-2019-1-3-8 // *Тракторы и сельхозмашины*. – 2019. – № 1. – С. 3–8 URL: https://mospolytech.ru/storage/files/doi/file_7fc8ef54a8154c28341bf9a47443a5ce_1562003337.pdf (дата обращения: 10.02.2020). – Рез. англ.

11. **Друзыанова, В. П.** Методика разработки и обоснования параметров фильтра по очистке биогаза для использования в двигателях внутреннего сгорания / В. П. Друзыанова, О. П. Семенова, Г. А. Соловьев // *Ремонт. Восстановление. Модернизация*. – 2019. – № 1. – С. 11–14. URL: http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=2869 (дата обращения: 10.02.2020). – Рез. англ.

12. **Шуханов, С. Н.** Методика проведения тепловых испытаний агрегатов трансмиссии автотракторной техники агропромышленного комплекса / С. Н. Шуханов, В. В. Скutelный, О. Л. Маломыжев. – DOI 10.34286/1995-4646-2019-66-3-77-83 // *Международный технико-экономический журнал*. – 2019. – № 3. – С. 77–83. URL: <http://www.tite-journal.com/content/2019/vypusk-no3/#c12067> (дата обращения: 10.02.2020). – Рез. англ.

13. **Шуханов, С. Н.** Моделирование рабочих процессов машинно-тракторных агрегатов агропромышленного комплекса / С. Н. Шуханов, А. В. Кузьмин, П. А. Болоев // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. – 2019. – № 1 (75). – С. 74–75. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-rabochih-protsessov-mashinno-traktornyh-agregatov-agropromyshlennogo-kompleksa> (дата обращения: 10.02.2020).

14. **Важенин, А. Н.** Динамическая модель МТА с учетом условий его функционирования / А. Н. Важенин, Б. А. Арютов, А. В. Пасин // *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. – 2007. – № 9. – С. 21–23.

15. **Пасин, А. В.** Сезонное расписание и темпы выполнения полевых механизированных работ / А. В. Пасин, Б. А. Арютов, Р. В. Кошелев [и др.] // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2007. – № 11. – С. 2–4.
16. **Арютов, Б. А.** Повышение эффективности производственных процессов в растениеводстве / Б. А. Арютов, А. И. Новожилов, А. В. Пасин [и др.] // Техника в сельском хозяйстве. – 2007. – № 6. – С. 50–51.
17. **Арютов, Б. А.** Процедуры многокритериальной оптимизации производственных процессов в растениеводстве / Б. А. Арютов, А. В. Пасин, А. В. Бакланов // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина». – 2007. – № 3 (1). – С. 61–65.
18. **Важенин, А. Н.** Оптимальная сезонная продолжительность выполнения полевых механизированных работ / А. Н. Важенин, А. В. Пасин, Б. А. Арютов [и др.] // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина». – 2007. – № 3 (2). – С. 67–69.
19. **Важенин, А. Н.** Регулирование движения МТА / А. Н. Важенин, Б. А. Арютов, А. В. Пасин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2008. – № 2. – С. 28–29.
20. **Важенин, А. Н.** Упорядочение производственных процессов в растениеводстве / А. Н. Важенин, Б. А. Арютов, А. В. Пасин [и др.] // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2008. – № 6. – С. 9–11.
21. **Важенин, А. Н.** Оптимизация технической оснащенности производственных процессов в растениеводстве с учетом условий их функционирования / А. Н. Важенин, Б. А. Арютов, А. В. Пасин [и др.] // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина». – 2008. – № 3 (2). – С. 72–76. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-tehnicheskoy-osnashchennosti-proizvodstvennyh-protsessov-v-rastenievodstve-s-uchetom-usloviy-ih-funktsionirovaniya> (дата обращения: 10.02.2020).
22. **Шкрабак, С. Н.** Оптимизация работы МТА в технологических звеньях поточных линий / С. Н. Шкрабак, А. В. Бечин // Сельский механизатор. – 2007. – № 5. – С. 40–41. URL: http://sel-mech.msk.ru/507.htm#_ТЕХНИКЕ_ДОЛГИЙ_ВЕК (дата обращения: 10.02.2020).
23. **Галиев, И. Г.** Управление работоспособностью техники с учетом условий аграрного производства / И. Г. Галиев, И. Р. Исахов, А. Р. Шамсутдинов [и др.] // Вестник Казанского ГАУ. – 2010. – № 3 (17). – С. 86–88. URL: http://www.vestnik-kazgau.com/images/archive/2010/3/23_galiev.pdf (дата обращения: 10.02.2020). – Рез. англ.
24. **Новожилов, А. И.** К обоснованию интенсивных методов повышения эффективности использования механизированных технологических комплексов / А. И. Новожилов // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2011. – № 7. – С. 52–55. URL: http://agrojr.ru/index.php/asj/issue/view/135/2011_7 (дата обращения: 10.02.2020). – Рез. англ.
25. **Новожилов, А. И.** Статистическая оценка надежности машинно-тракторных агрегатов / А. И. Новожилов, Б. А. Арютов, А. А. Тихонов // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2011. – № 2 (14). – С. 108–110. URL: [https://vestnik.ulsau.ru/upload/iblock/923/vestnik-2011-2\(14\).pdf](https://vestnik.ulsau.ru/upload/iblock/923/vestnik-2011-2(14).pdf) (дата обращения: 10.02.2020). – Рез. англ.
26. **Николаенко, А. В.** Обоснование величин оптимальных эксплуатационных допусков на регулировочные параметры топливной дизелей сельскохозяйственных тракторов / А. В. Николаенко, В. Н. Хватов, В. Н. Сергеев // Двигателестроение. – 1983. – № 7. – С. 45–48.

Поступила 17.09.2019; принята к публикации 20.12.2019; опубликована онлайн 31.03.2020

Об авторах:

Шуханов Станислав Николаевич, профессор кафедры технического обеспечения АПК инженерного факультета ФГБОУ ВО «Иркутский государственный аграрный университет имени А. А. Ежевского» (664038, Россия, Иркутская область, пос. Молодёжный), доктор технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2134-6871>, shuhanov56@mail.ru

Кузьмин Александр Викторович, профессор кафедры технического сервиса и общинженерных дисциплин инженерного факультета ФГБОУ ВО «Иркутский государственный аграрный университет имени А. А. Ежевского» (664038, Россия, Иркутская область, пос. Молодёжный), доктор технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5669-2232>, kuzmin_burgsha@mail.ru

Болоев Петр Антонович, профессор кафедры машиноведения ФГБОУ ВО «Бурятский государственный университет имени Доржи Банзарова» (670000, Россия, г. Улан-Удэ, ул. Смолина, д. 24а), доктор технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3940-1296>

Заявленный вклад соавторов:

С. Н. Шуханов – формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов; А. В. Кузьмин – анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов; П. А. Болоев – доработка текста, корректировка выводов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Shuhanov S.N. Interaction Elements of Particles of Grain Lots with Air during the Work of Tape Thrower. *Agrarian Scientific Journal*. 2015; 12:58-59. (In Eng.)
2. Samoilenko D., Marchenko A., Cho H.M. Improvement of Torque and Power Characteristics of V-Type Diesel Engine Applying New Design of Variable Geometry Turbocharger (VGT). *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2017; 31(10):5021-5027. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s12206-017-0950-2>
3. Ovchinnikov A.S., Mezhevova A.S., Novikov A.E., et al. Energy and Agrotechnical Indicators in the Testing of Machine-Tractor Units with Subsoiler. *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017; 12(24):7150-7160. Available at: http://www.arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2017/jeas_1217_6597.pdf (accessed 10.02.2020). (In Eng.)
4. Butenko A.F., Asaturyan A.V. To the Basis of an Use Efficiency of a Combined Belt Grain Thrower. *Mezhdunarodny tekhniko-ekonomicheskij zhurnal* = The International Technical-Economic Journal. 2018; (1):80-86. Available at: http://www.tite-journal.com/fileadmin/fail/tite-journal_1_2018/Butenko.pdf (accessed 10.02.2020). (In Russ.)
5. Nuralin B., Bakushev A., Janaliev M., et al. Constructive-Regime Parameters of Rotor-Brush Cleaner for Tuberos Foots Dry Cleaning. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2018; 40(2). 113 p. (In Eng.)
6. Piven V.V. Determination of the Extent of Fraction in Air Separation of Grain Material. *Journal of Physics Conference Series*. 2018; 1059(1):012001. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1059/1/012001>
7. Altukhov S.V., Shukhanov S.N. Analysis of Hydrodynamic Characteristics of Sprays of Nozzles of ICE. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2018; (3):3-6. Available at: https://mospolytech.ru/storage/f033ab37c30201f73f142449d037028d/files/Traktory_i_selkhoz_mashiny_No3_2018.pdf (accessed 10.02.2020). (In Russ.)

8. Shukhanov S.N., Kuzkin A.Yu., Skutelnik V.V., et al. Elements of Interaction of Gear Drives of Mechanical Transmissions of Auto-Tractor Machinery. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Orenburg State Agrarian University Bulletin. 2018; (1):107-109. Available at: https://orensau.ru/images/stories/docs/izvestia/2018/Izvestia_1_69.pdf (accessed 10.02.2020). (In Russ.)
9. Druzyanova V.P., Dondokov Y.Zh., Osmonov O.M., et al. Mathematical Model of Biogas Treatment Process with a Zeolite Filter. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2018; 9(9):280-288. Available at: https://www.researchgate.net/publication/328272717_Mathematical_model_of_biogas_treatment_process_with_a_zeolite_filter (accessed 10.02.2020). (In Eng.)
10. Boloyev P.A., Druzyanova V.P., Petrov N.V. Experimental Test Bench for the Study of a Power Plant with a Biogas Internal Combustion Engine. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2019; (1):3-8. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2019-1-3-8>
11. Druzyanova V.P., Semyonova O.P., Solovyov G.A. Procedures for Development and Justification of Filter Parameters for Biogas Cleaning To Use It in Internal Combustion Engines. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya* = Repair. Restoration. Modernization. 2019; (1):11-14. Available at: http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=2869 (accessed 10.02.2020). (In Russ.)
12. Shukhanov S.N., Skutelnik V.V., Malomyzhev O.L. Technique of Carrying Out Heat Tests of Units of Transmission of the Autotractor Machinery of Agro-Industrial Complex. *Mezhdunarodnyy tekhniko-ekonomicheskyy zhurnal* = International Technical-Economic Journal. 2019; (3):77-83. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.34286/1995-4646-2019-66-3-77-83>
13. Shukhanov S.N., Kuzmin A.V., Boloev P.A. Modeling of the Working Processes of the Machine-Tractor Units of Agro-Industrial Complex. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Orenburg State Agrarian University Bulletin. 2019; (1):74-75. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-rabochih-protsessov-mashinno-traktornyh-agregatov-agropromyshlennogo-kompleksa> (accessed 10.02.2020). (In Russ.)
14. Vazhenin A.N., Aryutov B.A., Pasin A.V. Dynamical Model MTA (Machine-and-Tractor Unit) with Account for Conditions of Its Functioning. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2007; (9):21-23. (In Russ.)
15. Pasin A.V., Aryutov B.A., Koshelev R.V., et al. Seasonal Schedule and Pace of Execution of Field Mechanized Works. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva* = Mechanization and Electrification of Agriculture. 2007; (11):2-4. (In Russ.)
16. Aryutov B.A., Novozhilov A.I., Pasin A.V., et al. Increasing Effectiveness of Production Processes in the Plant Industry. *Tekhnika v selskom khozyaystve* = Machinery in Agriculture. 2007; (6):50-51. (In Russ.)
17. Aryutov B.A., Pasin A.V., Baklanov A.V. Procedures for Multi-Criteria Optimization of Production Processes in Crop Production. *Vestnik Federalnogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya "Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet imeni V.P. Goryachkin"* = Bulletin of the Goryachkin Moscow State Agroengineering University. 2007; (3):61-65. (In Russ.)
18. Vazhenin A.N., Pasin A.V., Aryutov B.A. Optimal Seasonal Duration of Field Mechanized Works. *Vestnik Federalnogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya "Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet imeni V.P. Goryachkin"* = Bulletin of the Goryachkin Moscow State Agroengineering University. 2007; (3):67-69. (In Russ.)
19. Vazhenin A.N., Aryutov B.A., Pasin A.V. Traffic Control for Machine and Tractor Units. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2008; (2):28-29. (In Russ.)
20. Vazhenin A.N., Aryutov B.A., Pasin A.V., et al. Streamlining of Production Processes in Crop Production. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva* = Mechanisation and Electrification of Agriculture. 2008; (6):9-11. (In Russ.)
21. Vazhenin A.N., Aryutov B.A., Pasin A.V., et al. Optimization of Technical Equipment for Plant Production in View of Operation Requirements. *Vestnik Federalnogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya "Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet imeni V.P. Goryachkin"* = Bulletin of the Goryachkin Moscow State Agroengineering University.

ty. 2008; (3):72-76. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-tehnicheskoy-osnaschenosti-proizvodstvennyh-protseessov-v-rastenievodstve-s-uchetom-usloviy-ih-funktsionirovaniya> (accessed 10.02.2020). (In Russ.)

22. Shkrabak S.N., Bechin A.V. Optimization of the Machine and Tractor Unit Operation in the Process Links of the Flow Lines. *Selskiy Mekhanizator* = Rural Mechanic. 2007; (5):40-41. Available at: http://selmech.msk.ru/507.htm#_ТЕХНИКЕ_–_ДОЛГИЙ_БЕК (accessed 10.02.2020). (In Russ.)

23. Galiev I.G., Iskhakov I.R., Shamsutdinov A.R., et al. Management Operability of Equipment from the Conditions of Agricultural Production. *Vestnik Kazanskogo GAU* = Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2010; (3):86-88. Available at: http://www.vestnik-kazgau.com/images/archive/2010/3/23_galiev.pdf (accessed 10.02.2020). (In Russ.)

24. Novozhilov A.I. To the Rationale of Intensive Methods of Efficiency Increasing of Use of Mechanized Technological Complexes. *Vestnik Saratovskogo gosagrouniversiteta im. N.I. Vavilova* = Vavilov Saratov State Agrarian University Bulletin. 2011; (7):52-55. Available at: http://agrojr.ru/index.php/asj/issue/view/135/2011_7 (accessed 10.02.2020). (In Russ.)

25. Novozhilov A.I., Aryutov B.A., Tikhonov A.A. Statistical Evaluation of Reliability Machine Tractor Units. *Vestnik Ulyanovskoy gosudarstvennoy selskohozyaystvennoy akademii* = Ulyanovsk State Agricultural Academy Bulletin. 2011; (2):108-110. Available at: [https://vestnik.ulsau.ru/upload/iblock/923/vestnik-2011-2\(14\).pdf](https://vestnik.ulsau.ru/upload/iblock/923/vestnik-2011-2(14).pdf) (accessed 10.02.2020). (In Russ.)

26. Nikolaenko A.V., Khvatov V.N., Sergeev V.N. Justification of Values of Optimal Operational Tolerances for Adjustment Parameters of Fuel Diesel Engines of Agricultural Tractors. *Dvigatelistroenie* = Engine Building. 1983; (7):45-48. (In Russ.)

Received 17.09.2019; revised 20.12.2019; published online 31.03.2020

About the authors:

Stanislav N. Shukhanov, Professor of Engineering Chair, Irkutsk State Agrarian University named after A. A. Ezhevsky (Village Molodezhnyy, Irkutsk Oblast 664038, Russia), D.Sc. (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2134-6871>, shuhanov56@mail.ru

Aleksandr V. Kuzmin, Professor of Technical Service and General Engineering Chair, Irkutsk State Agrarian University named after A. A. Ezhevsky (Village Molodezhnyy, Irkutsk Oblast 664038, Russia), D.Sc. (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5669-2232>, kuzmin_burgsha@mail.ru

Petr A. Boloyev, Professor of Engineering Chair, Buryat State University (24a Smolin St., Ulan-Ude 670000, Russia), D.Sc. (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3940-1296>

Contribution of the authors:

S. N. Shukhanov – formulating the basic concept, goals and objectives of the study, making calculations, writing the draft, drawing the conclusions; A. V. Kuzmin – analysis of the research results, revision of the text, correction of conclusions; P. A. Boloyev – revision of the text, correction of conclusions.

All authors have read and approved the final manuscript.