

2. Гайдар С.М., Заяц Ю.А., Заяц Т.М., Власов А.О. Подходы к определению технического состояния транспортных средств // Грузовик. 2015. № 5. С. 27-30

3. Кравченко И.Н., Гайдар С.М., Жуков Л.В., Ларин П.Г. Обоснование факторов, оказывающих влияние на надежность специальной техники в особых условиях эксплуатации // Фундаментальные исследования. 2014. № 3-2. С. 262-266.

4. Кушнарев Л.И., Чепурина Е.Л., Чепурин А.В. К повышению конкурентоспособности российской сельскохозяйственной техники // Наука без границ. 2018. - № 5 (22). –С.44-51.

5. Л. И. Кушнарев, Е. Л. Чепурина, С. Л. Кушнарев, А. В. Чепурин. Организация эффективного использования машинно-тракторного парка: учебник для вузов / Под общей редакцией профессора Кушнарера Л. И. М. : ФГНУ «Росинформагротех», 2015. 270 с.

УДК 631.37

## **ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН В АПК**

*Наджи Наджм Абдулзахра Фархунд, аспирант кафедры материаловедения и технологии машиностроения, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, njem.abd12@yahoo.com*

***Аннотация:** Надежность ремонтно-технологического оборудования рассчитывается не только на стадии проектирования, но и в процессе эксплуатации и обслуживания с целью оценки прочности, деформаций, тепловых полей и других характеристик базовых деталей. Представленные математические модели позволяют прогнозировать их долговечность на основе характеристик лимитирующих надежность узлов.*

***Ключевые слова:** ремонтно-технологическое оборудование, надежность, безотказность, температурный режим, жесткость.*

Характер использования ремонтно-технологического оборудования (РТО) при современном уровне технического оснащения механизированных процессов в сельском хозяйстве во времени является прерывно-кратковременным. Рабочие циклы РТО в производственном цикле чередуются с агротехническими перерывами, позволяющими по своей продолжительности осуществлять в полном объеме ремонтно-обслуживающие воздействия (РОВ).

Концентрация РОВ, осуществляемых оборудованию перед предстоящими рабочими циклами, интенсификация стационарного процесса технического обслуживания и ремонта (ТОР) с целью обеспечения дифференцированного ресурса составным частям (СЧ) узлов определяют увеличение разовой трудоемкости профилактических работ в несколько раз по сравнению с

нормативами регламентного ТО и ремонта. Удельная трудоемкость (на единицу выполненной работы) РОВ за время производственного цикла использования оборудования при этом не должна превышать величины аналогичного показателя в существующем процессе ТОР.

$$C_{уд}(K_{уп}) = \min \frac{C_0 + U_K(K_{уп}) + U_{PP}(K_{уп}) + C_{зпч}(K_{уп}) + U_{от}(K_{уп}) + C_{СП} \cdot P_{СП} + C_{БЖ}}{T_{сл}} \quad (1)$$

где  $K_{уп}$  – комплекс управляющих параметров  $\{S, P, R, \Pi, D\}$ , включающий:  $S$  – стратегию ремонта составной части,  $P$  – структуру и содержание ремонтных воздействий,  $R$  – критерии предельного состояния (КПС) и правила назначения вида ремонта,  $\Pi$  – правила определения рационального объема попутных ремонтных работ,  $D$  – технические требования на диагностирование и контроль параметров технического состояния;  $C_0, C_{СП}$  – средние затраты, связанные с приобретением и списанием рассматриваемого оборудования, руб.;  $U_K(K_{уп})$  – издержки на проведение контрольно-диагностических работ, руб.;  $U_{PP}(K_{уп})$  – издержки на проведение ремонтных работ, руб.;  $C_{зпч}(K_{уп})$  – стоимость замененных запасных частей, руб.;  $U_{от}(K_{уп})$  – потери, связанные с устранением последствий отказов, руб.;  $P_{СП}$  – вероятность списания оборудования;  $C_{БЖ}$  – средние затраты, связанные с мероприятиями по безопасности жизнедеятельности и охране окружающей среды.

Предупреждение постепенных отказов в математической модели [1 – 5] проводится путем определения оптимальных допустимых величин параметров состояния СЧ и межконтрольных наработок. Предупреждение внезапных отказов – установлением оптимальной наработки до плановых профилактик (попутно с плановым сложным ТО или текущим (ТР) и капитальным ремонтами (КР), назначаемыми по состоянию), при которой внезапно отказывающие элементы регламентно заменяются. Совместное обоснование сроков предупреждения постепенных и внезапных отказов формализованно может быть представлено следующей математической моделью:

$$\sum_{j=1}^m U_j = \min \left[ \sum_{i_1=1}^{n_1} U_{ТО}(D, t) + \sum_{i_2=1}^{n_2} U_{TP-1}(D, t) + \sum_{i_3=1}^{n_3} U_{TP-2}(D, t) + \dots + \sum_{i_N=1}^{n_N} U_{TP-N}(D, t) + \sum_{i_{N+1}=1}^{n_{N+1}} U_{КР}(D, t) + \right. \\ \left. + \sum_{z_1=1}^{k_1} U_{ТО}(t) + \sum_{z_2=1}^{k_2} U_{TP-1}(t) + \sum_{z_3=1}^{k_3} U_{TP-2}(t) + \dots + \sum_{z_N=1}^{k_N} U_{TP-N}(t) + \sum_{z_{N+1}=1}^{k_{N+1}} U_{КР}(t) \right], \quad (2)$$

где  $U_{ТО}(D, t), U_{TP-1}(D, t), U_{TP-2}(D, t), \dots, U_{TP-N}(D, t), U_{КР}(D, t)$  – характеризуют соответственно издержки при сложном ТО, разновидностях ТР и КР по  $i$ -м параметрам, обуславливающим постепенные отказы;  $U_{ТО}(t), U_{TP-1}(t), U_{TP-2}(t), \dots, U_{TP-N}(t), U_{КР}(t)$  – издержки при сложном ТО, разновидностях ТР и КР по  $z$ -м внезапным отказам;  $n_1, n_2, \dots, n_N, n_{N+1}$  – количество постепенных отказов по

параметрам, контролируемым при сложном ТО, разновидностях ТР и КР;  $k_1, k_2, \dots, k_N, k_{N+1}$  – количество внезапных отказов.

Одним из основных узлов РТО, в частности металлообрабатывающего станка модели 1А616, непосредственно влияющим на производительность обработки и точность восстанавливаемых деталей является шпиндельный узел (ШУ). Требования к ШУ по долговечности, безотказности, быстроходности и точности растут.

Достижение высоких показателей зависит от многих факторов, в том числе и от возможностей проектировщика использовать результаты компьютерного анализа. Одними из важных показателей качества ШУ являются его жесткостные характеристики, а также температурные факторы, поскольку они наиболее полно характеризуют качество его конструкции, изготовления и сборки.

На жесткость рассчитывают ШУ всех типов станков, используемых в ремонтных предприятиях АПК. При этом определяют упругое перемещение шпинделя в сечении его переднего конца, для которого производится стандартная проверка шпиндельного узла на жесткость. Это перемещение принимают в качестве упругого перемещения переднего конца шпинделя, определяющегося с учетом действия защемляющего момента:

$$\delta = P \cdot \left[ \frac{a^2}{3 \cdot E \cdot I_1} + \frac{a^2 \cdot L \cdot (1 - \varepsilon)}{3 \cdot E \cdot I_2} + \frac{j_A \cdot a^2 \cdot (1 - \varepsilon) + j_B \cdot [L + a \cdot (1 - \varepsilon)]^2}{j_A \cdot j_B \cdot L^2} \right] \pm Q \cdot (1 - \varepsilon) \times \left[ \frac{j_B \cdot (L + a) - j_A \cdot (L - b)}{j_A \cdot j_B \cdot L^2} - \frac{a \cdot (b^3 + 2 \cdot b \cdot L^2 - 3 \cdot b^2 \cdot L)}{3 \cdot E \cdot I_2 \cdot L} \right] \quad (3),$$

где  $a$  – консоль переднего конца шпинделя, мм;  $\varepsilon$  – коэффициент защемления;  $b$  – расстояние от приводного элемента до передней опоры, мм;  $L$  – расстояние между передней А и задней В опорами шпинделя, мм;  $E$  – модуль упругости материала (сталь) шпинделя, Н/см<sup>2</sup>;  $j_A$  – радиальная жесткость передней опоры шпинделя, Н/см;  $j_B$  – радиальная жесткость задней опоры шпинделя, Н/см;  $P$  – радиальная составляющая силы резания, Н;  $Q$  – радиальная сила на приводном элементе, Н;  $I_1$  – среднее значение осевого момента инерции сечения консоли, мм<sup>4</sup>;  $I_2$  – среднее значение осевого момента инерции сечения шпинделя в пролете между опорами, мм<sup>4</sup>.

Температурные деформации технологической системы оказывают большое влияние на точность выполнения операций по восстановлению поверхностей деталей. В процессе механической обработки происходит нагрев технологической системы, а при перерывах в работе – ее охлаждение. Источниками нагрева являются: тепло, образующееся в зоне резания, тепло, выделяющееся в узлах станка, из-за потерь на трение, а также тепло от внешних источников. Распределение температуры по длине шпинделей РТО от теплообразования в подшипниках для простой модели стержня бесконечной длины определяется по математической модели:

$$\vartheta_0 = Q_{\Pi} / \sqrt{k_T \cdot \lambda \cdot A \cdot U}, \quad (4)$$

где  $Q_{\Pi}$  – тепловой поток в шпиндель из подшипника, Вт;  $k_T$  – коэффициент теплоотдачи вращающегося вала, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $A = \pi d^2/4$  и  $U = \pi d$  – площадь, м<sup>2</sup>.

Изменение температуры деталей  $v$  и температурных деформаций  $\Delta l$  при внезапном скачкообразном изменении температуры окружающей среды (например, при переносе в другой цех) можно рассчитать по математической модели:

$$\vartheta_0 = \vartheta_0 = \vartheta_0 \cdot e^{-m\tau} \cdot u \cdot \Delta l = \alpha \cdot l \cdot \vartheta, \quad (5)$$

где  $v_0$  – начальная избыточная температура детали по отношению к температуре окружающей среды сразу после скачка, °C;  $v$  – избыточная температура детали в момент времени  $\tau$  от скачка, °C;  $\tau = k_T A / (c \cdot G)$ ;  $A$  – площадь теплоотдающей поверхности, м<sup>2</sup>;  $c$  – удельная теплоемкость, Дж/(кг·°C);  $G$  – масса детали, кг;  $l$  – длина детали, м.

По данным математическим моделям спроектирована модель шпинделя с опорами качения станка модели 1А616 для дальнейшего анализа средствами ЭВМ с целью прогнозирования его долговечности по жесткостным и температурным характеристикам.

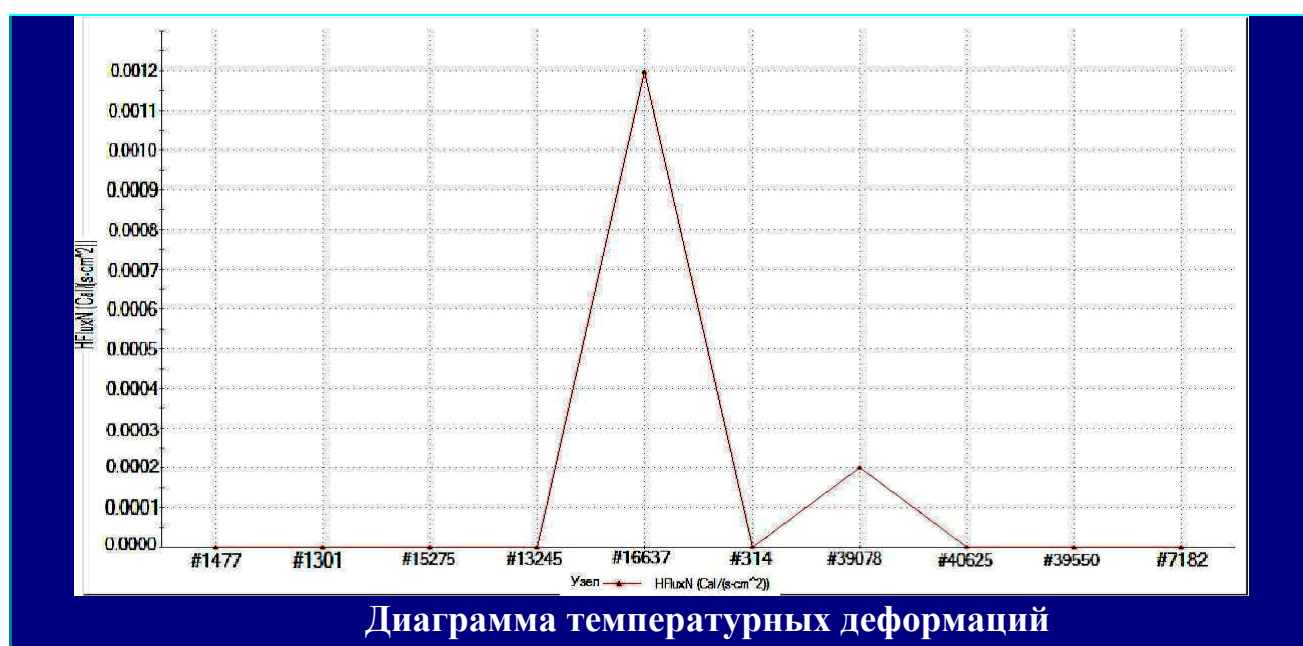
По результатам анализа (рис. 1), можно сделать вывод, что наиболее серьезные перемещения возникают на конце шпинделя. На эпюре перемещений выделены наиболее важные участки перемещений, которые должны быть взяты на вооружение в процессе эксплуатации. В дополнение к эпюре сформирована диаграмма упругих перемещений по результатам зондирования основных узлов исследуемого компонента. Очевидно, что наибольшие перемещения возникают на последней точке диаграммы (т.е. на конце шпинделя).



Рис. 1. Результаты анализа шпинделя на жесткость

Наиболее серьезные температурные деформации (рис. 2) возникают в опорах качения. На температурной эпюре выделены наиболее важные участки,

которые существенно влияют на точность вращения и точность восстановления детали, оказывая отрицательный эффект как на единицу РТО, так и на отдельные его узлы. В дополнение к эпюре по результатам зондирования основных узлов исследуемого компонента сформирована диаграмма температурных деформаций. Очевидно, что наибольшие температурные деформации возникают в опорах качения. Наиболее высокая температура обусловлена повышенным трением компонентов ШУ. Таким образом, на стадии проектирования следует принимать конструктивные меры как по ликвидации перемещений, отрицательно влияющих на точность механической обработки и восстановление деталей, так по частичному или полному устранению температурных деформаций для обеспечения наиболее длительной безотказной работы всего узла РТО.



**Диаграмма температурных деформаций**

**Рис. 2. Результаты температурного анализа шпинделя**

Анализ показывает, что полученные выходные характеристики обеспечивают достаточный коэффициент достоверности исследуемых параметров и позволяют сделать правильные решения при инженерных расчетах. Таким образом, представленные математические модели и результаты анализа основных параметров надежности узлов ремонтно-технологического оборудования, позволяют оптимизировать конструкции шпинделей, а также прогнозировать их долговечность и безотказность на основе выходных характеристик при автоматизированном проектировании.

#### Библиографический список

1. Мачнев А. В. Вибрационные процессы при работе коробок передач тракторов / А. В. Мачнев, В. А. Мачнев, В. А. Комаров, И. М. Зябиров // Нива Поволжья. – 2014. – № 4. – С. 91 – 94.

2. Комаров В. А. Формирование надежности ремонтно-технологического оборудования на сервисных предприятиях / В. А. Комаров, В. А. Мачнев, А. В. Григорьев // Техника и оборудование для села. – 2015. – № 5. – С. 33 – 36.

3. Гайдар С.М., Свечников В.Н., Усманов А.Ю., Иванов М.И. Улучшение эксплуатационных характеристик двигателя с применением нанотехнологий // Труды ГОСНИТИ. 2013. Т. 111. № 1. С. 4-8.

4. Гайдар С.М., Чумаков А.Г. Перспективы применения нанотехнологий в двигателестроении //Авиационно-космическая техника и технология. 2009.№10(67). С. 12-16.

5. Гайдар С.М. Характеристика и показатели наноматериалов для снижения износа деталей сельхозмашин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2009. № 12. С. 20-22.

УДК681.3+631.6

## **ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ**

*Горностаев Владислав Игоревич, к.т.н. ст. преподаватель кафедры технической эксплуатации технологических машин и оборудования природообустройства РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, [vgornostaev@rgau-msha.ru](mailto:vgornostaev@rgau-msha.ru)*

*Новиченко Антон Игоревич, к.т.н. доцент, доцент кафедры технической эксплуатации технологических машин и оборудования природообустройства РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, [novichenko@rgau-msha.ru](mailto:novichenko@rgau-msha.ru)*

*Анисимов Андрей Валерьевич, аспирант кафедры технической эксплуатации технологических машин и оборудования природообустройства РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, [giffugo@yandex.ru](mailto:giffugo@yandex.ru)*

**Аннотация:** в статье рассмотрены основные методы функционального моделирования в решении задач производственно-технической эксплуатации машин в природообустройстве.

**Ключевые слова:** цифровой двойник, цифровая тень, функциональное моделирование, производственно-техническая эксплуатация.

Современные тенденции развития экономики России направлены в сторону цифровизации, в соответствии с государственной программой «Цифровая экономика Российской Федерации». Согласно целям, поставленным перед программой инструментами для их реализации будут являться следующие информационные технологии: большие данные;нейротехнологии и искусственный интеллект;системы распределенного реестра;квантовые технологии;новые производственные технологии;промышленный интернет;компоненты робототехники и сенсорики;технологии беспроводной связи;технологии виртуальной и дополненной реальностей [1].