

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

С. М. Гайдар, А. Ф. Наджи, П. В. Беззубцева

*ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»
(г. Москва, Российская Федерация)*

***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.*

INCREASING THE RELIABILITY OF TRANSPORTATION AND TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

S. M. Gaidar, A. F. Nadzhi, P. V. Bezzubtceva

*Russian Timiryazev State Agrarian University
(Moscow, Russian Federation)*

***Abstract:** The reliability of repair and technological equipment is calculated not only at the design stage, but also during operation and maintenance in order to assess the strength, deformations, thermal fields and other characteristics of basic parts. The presented mathematical models make it possible to predict their durability based on the characteristics of the nodes limiting the reliability.*

***Keywords:** repair and technological equipment; reliability; reliability; temperature conditions; rigidity.*

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 перерыва-

ми, 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 предопределяют 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 [1-3].

Одновременное проведение предупредительных контрольно-диагностических (КДР) и ремонтных воздействий (РВ) улучшает характеристики безотказности. Другими словами, минимальным удельным издержкам соответствует оптимальный уровень безотказности по прогнозируемым отказам. Исходя из этого в качестве критерия совместной оптимизации допускаемых параметров технического состояния деталей РТО, и системы ТОР принят минимум суммарных удельных затрат СУД на проведение КДР, предупредительных ремонтов и устранение последствий отказов с учетом возможных потерь от вынужденных простоев и ухудшения функционирования оборудования:

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

где $K_{уп}$ – комплекс управляющих параметров $\{S, P, R, П, D\}$, включающий: S – стратегию ремонта составной части, P – структуру и содержание ремонтных воздействий, R – критерии предельного состояния (КПС) и правила назначения вида ремонта, $П$ – 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 заме-

ненных запасных частей, руб.; $U_{OT}(K_{УП})$ – 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 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 отказывающиеся элементы регламентно заменяются. Совместное обоснование сроков предупреждения постепенных и внезапных отказов формализованно может быть представлено следующей математической моделью:

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

где $U_{TO}(D,t)$, $U_{TP-1}(D,t)$, $U_{TP-2}(D,t)$, ..., $U_{TP-N}(D,t)$, $U_{KP}(D,t)$ – характеризуют соответственно издержки при сложном ТО, разновидностях ТР и КР по i -м параметрам, обуславливающим постепенные отказы; $U_{TO}(t)$, $U_{TP-1}(t)$, $U_{TP-2}(t)$, ..., $U_{TP-N}(t)$, $U_{KP}(t)$ – 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. 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 заземляющего момента:

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

$$\times \left[\frac{j_B \cdot (L + a) - j_A \cdot (L - b)}{j_A \cdot j_B \cdot L^2} - \frac{a \cdot (b^3 + 2 \cdot b \cdot L^2 - 3 \cdot b^2 \cdot L)}{3 \cdot E \cdot I_2 \cdot L} \right] \quad (3),$$

где a – консоль переднего конца шпинделя, мм; ε – коэффициент заземления; 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/см²; 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, мм⁴; I_2 – среднее значение осевого момента инерции сечения шпинделя в пролете между опорами, мм⁴.

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 [4-7]. 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_{Π} – тепловой поток в шпиндель из подшипника, Вт; k_T – коэффициент теплоотдачи вращающегося вала, Вт/(м²·°С); $A = \pi d^2/4$ и $U = \pi d$ – площадь, м².

Изменение температуры деталей v и температурных деформаций Δl 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, °С; v – избыточная температура детали в момент времени τ от скачка, °С; $\tau = kT \cdot A / (c \cdot G)$; A – площадь теплоотдающей поверхности, м²; c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С); G – масса детали, кг; l – длина детали, м.

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.

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.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Комаров В. А., Григорьев А. В., Мартышкин А. П. Целевые функции оптимизации параметров точности технологического оборудования // Тракторы и сельхозмашины. 2013. № 7. С. 44-47.

2. Улучшение эксплуатационных характеристик двигателя с применением нанотехнологий / С. М. Гайдар, В. Н. Свечников, А. Ю. Усманов, М. И. Иванов // Труды ГОСНИТИ. 2013. Т. 111. № 1. С. 4-8.
3. Гайдар С. М., Чумаков А. Г. Перспективы применения нанотехнологий в двигателестроении // Авиационно-космическая техника и технология. 2009. № 10 (67). С. 12-16.
4. Комаров В. А., Григорьев А. В. Прогнозирование параметрической надежности узлов технологического оборудования по выходным параметрам точности // Тракторы и сельхозмашины. 2013. № 8. С. 51-53.
5. Комаров В. А., Мачнев В. А., Григорьев А. В. Формирование надежности ремонтно-технологического оборудования на сервисных предприятиях // Техника и оборудование для села. 2015. № 5. С. 33-36.
6. Гайдар С. М., Карелина М. Ю. Инновационное техническое средство для нанесения защитной молекулярной пленки на поверхность машин // Техника и оборудование для села. 2015. № 3. С. 26-28.
7. Гайдар С. М., Петровская Е. А., Петровский Д. И. Повышение коррозионной стойкости оборудования, работающего в агрессивных средах АПК путем применения полифункциональных ингибиторов // Инновационные технологии и технические средства для АПК. 2016. С. 74-77.
8. Гайдар С. М., Быкова Е. В., Карелина М. Ю. Перспективы использования лакокрасочных материалов, модифицированных фторсодержащими поверхностноактивными веществами, для защиты сельхозтехники // Техника и оборудование для села. 2015. С. 34-38
9. Пат. 2553001 Российская Федерация. Консервационная консистентная смазка / Гайдар С. М., Дмитриевский А. Л., Петровский Д. И., Петровская Е. А. № 2014115955/04; заявл. 22.04.2014; опубл. 10.06.2015.

REFERENCES

1. Komarov V. A., Grigor`ev A. V., Marty`shkin A. P. Celevy`e funkicii optimizacii parametrov tochnosti texnologicheskogo oborudovaniya [Objective functions of optimization of parameters of precision of technological equipment]. *Traktory` i sel`xozmashiny*, 2013, no. 7, pp. 44-47.
2. Gajdar S. M., Svechnikov V. N., Usmanov A. Yu., Ivanov M. I. Uluchshenie e`kspluatacionny`x charakteristik dvigatelya s primeneniem nanotexnologij [Improving the performance of the engine using nanotechnology]. *Trudy` GOSNITI*, 2013, vol. 111, no. 1. pp. 4-8.
3. Gajdar S. M., Chumakov A. G. Perspektivy` primeneniya nanotexnologij v dvigatelestroenii [Prospects for the use of nano-technologies in engine building]. *Aviacionno-kosmicheskaya texnika i texnologiya*, 2009, no. 10 (67), pp. 12-16.
4. Komarov V. A., Grigor`ev A. V. Prognozirovanie parametricheskoy nadezhnosti uzlov texnologicheskogo oborudovaniya po vy`hodny`m par-

ametram tochnosti [Prediction of the parametric reliability of technological equipment units based on the output accuracy parameters]. *Traktory` i sel`xozmashiny*, 2013, no. 8, pp. 51-53.

5. Komarov V. A., Machnev V. A., Grigor`ev A. V. Formirovanie nadezhnosti remontno-texnologicheskogo oborudovaniya na servisny`x predpriyatiyax [Formation of reliability of repair and technological equipment at service enterprises]. *Texnika i oborudovanie dlya sela*, 2015, no. 5, pp. 33-36.

6. Gajdar S. M., Karelina M. Yu. Innovacionnoe texnicheskoe sredstvo dlya naneseniya zashhitnoj molekulyarnoj plenki na poverxnost` mashin [Innovative technical means for applying a protective molecular film on the surface of machines]. *Texnika i oborudovanie dlya sela*, 2015, no. 3, pp. 26-28.

7. Gajdar S. M., Petrovskaya E. A., Petrovskij D. I. Povy`shenie korrozionnoj stojkosti oborudovaniya, rabotayushhego v agresivny`x sredax APK putem primeneniya polifunkcional`ny`x ingibitorov [Increasing the corrosion resistance of equipment operating in aggressive environments of the agro-industrial complex by using multifunctional inhibitors]. *Innovacionny`e texnologii i texnicheskie sredstva dlya APK*, 2016, pp.74-77.

8. Gajdar S. M., By`kova E. V., Karelina M. Yu. Perspektivy` ispol`zovaniya lakokrasochny`x materialov, modifitsirovanny`x ftorsoderzhashimi poverxnostnoaktivny`mi veshhestvami, dlya zashhity` sel`xoztexniki [Prospects for the use of paints and varnishes modified with fluorinated surfactants for the protection of agricultural machinery]. *Texnika i oborudovanie dlya sela*, 2015, pp. 34-38.

9. Gajdar S. M., Dmitrievskij A. L., Petrovskij D. I., Petrovskaya E. A. Konservacionnaya konsistentnaya smazka [Preservation grease]. Patent 2553001 Russian Federation. No, 2014115955/04; appl. 22.04.2014; publ. 10.06.2015.

Об авторах:

Гайдар Сергей Михайлович, заведующий кафедрой «Материаловедения и технологии машиностроения» ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» (127550, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49), доктор технических наук, профессор, techmash@rgau-msha.ru.

Наджи Наджм Абдулзахра Фархунд, аспирант кафедры «Материаловедения и технологии машиностроения» ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» (127550, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49), njem.abd12@yahoo.com.

Беззубцева Полина Вадимовна, магистр ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» (127550, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49).

About the authors:

Sergey M. Gaidar, Head of the Department of Materials Science and Technology of Machine Building, Russian Timiryazev State Agrarian University (127550, Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya St., 49), D.Sc. (Engineering), professor, techmash@rgau-msha.ru.

Abdulzakhra F. Nadzhi, Postgraduate student of the Department of Materials Science and Engineering Technology, Russian Timiryazev State Agrarian University (127550, Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya St., 49), njem.abd12@yahoo.com.

Polina V. Bezzubtseva, master's degree, Russian Timiryazev State Agrarian University (127550, Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya St., 49).