

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 62-799

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-3-79-83

**Обеспечение контролепригодности подшипниковых узлов ведомого вала коробки перемены передач автомобиля КАМАЗ-5320***Александр Геннадиевич Пастухов, д-р техн. наук, профессор*pastukhov_ag@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8249-8970>*Евгений Петрович Тимашов[✉], д-р техн. наук, доцент*timachov@mail.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0003-0740-8714>

Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина; 308503, Российская Федерация, Белгородская обл., Белгородский р-н, п. Майский, ул. Вавилова, 1

Аннотация. Техническая диагностика, в частности, автоматическое диагностирование узлов механических трансмиссий, обеспечивает повышение показателей надежности транспортных и технологических машин. Технология контроля механической трансмиссии на основе цифровой термодиагностики предусматривает обеспечение контролепригодности диагностируемых узлов. Приспособленность узла к цифровой термодиагностике обусловлена его расположением, наличием смежных источников тепловыделения, величиной силовых и кинематических нагрузок. Контролепригодность узла обеспечивается расчетом теоретической величины температуры в зоне трения, определением зоны, пригодной для измерения диагностической температуры, вычислением зависимости между упомянутыми температурами. Контроль с применением специально разработанных программно-аппаратных комплексов производится автоматически путем сравнения температуры в зоне трения с предельной величиной. Для обеспечения контролепригодности подшипника 50412 ГОСТ 2893-82 коробки перемены передач автомобиля КАМАЗ-5320 определена теоретическая величина температуры в зоне трения 184,9°C при работе трансмиссии на первой передаче. Конечно-элементный анализ модели подшипникового узла в условиях стационарной теплопроводности позволил определить коэффициент пропорциональности 0,0812, связывающий температуру в зоне трения с диагностической температурой на поверхности крышки подшипника. В результате теоретических и экспериментальных исследований, включая тепловизионное наблюдение, определена температура в зоне трения 242,6°C, свидетельствующая о предотказном состоянии диагностируемого подшипника. Сходимость теоретической и экспериментальной температур обосновывает применение технологии цифровой термодиагностики к исследуемому узлу трансмиссии. Результаты исследований обосновывают применение технологии цифровой термодиагностики и установку датчика температуры на поверхности крышки подшипника.

Ключевые слова: трансмиссии, техническая диагностика, контролепригодность, подшипник, конечно-элементный анализ, тепловизионное наблюдение

Формат цитирования: Пастухов А.Г., Тимашов Е.П. Обеспечение контролепригодности подшипниковых узлов ведомого вала коробки перемены передач автомобиля КАМАЗ-5320 // *Агроинженерия*. 2023. Т. 25, № 3. С. 79-83. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-79-83>.

© Пастухов А.Г., Тимашов Е.П., 2023

ORIGINAL ARTICLE

Ensuring the controllability of rear bearings used in the driven shaft of the KAMAZ-5320 gearbox*Aleksandr G. Pastukhov, DSc (Eng), Professor*pastukhov_ag@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8249-8970>*Evgeniy P. Timashov[✉], DSc (Eng), Associate Professor*timachov@mail.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0003-0740-8714>

Belgorod State Agrarian University named after V. Gorin; 308503, 1, Vavilova Str., Mayskiy, Belgorod District, Belgorod Region, Russian Federation

Abstract. Technical diagnostics, and, particularly, automatic diagnostics of mechanical transmission units increases the reliability indicators of transport and processing machines. The technology of monitoring mechanical transmissions

based on digital thermal diagnostics ensures the controllability of the diagnosed units. The unit's adaptability to digital thermal diagnostics depends on its location, the presence of adjacent heat sources, the amount of power and kinematic loads. The controllability of the unit is ensured by determining the theoretical temperature value in the friction zone and the zone suitable for measuring the diagnostic temperature, and stating the relationship between the above temperatures. The control is carried out automatically, using specially developed software and hardware systems. To ensure the controllability of the bearing 50412 GOST 2893-82 of the KAMAZ-5320 gearbox, the authors determined the theoretical temperature value in the friction zone of 184.9°C during the gearbox operation in the first gear. The finite element analysis of the bearing assembly model under steady-state heat conduction determined a proportionality coefficient of 0.0812 relating the friction zone temperature to the diagnostic temperature on the bearing cap surface. As a result of theoretical and experimental studies involving thermal imaging, the temperature in the friction zone of 242.6°C was determined, indicating the pre-failure state of the diagnosed bearing. The approximate correspondence of theoretical and experimental temperatures showed the possibility of applying digital thermal diagnostics technology to the studied transmission unit. The comprehensive studies made it possible to justify the use of the digital thermal diagnostics technology and localize an area for installing a temperature sensor, namely, the bearing cover surface.

Keywords: transmission gears, technical diagnostics, thermal diagnostics, controllability, bearing, finite element analysis, thermal imager

For citation: Pastukhov A.G., Timashov E.P. Ensuring the controllability of rear bearings used in the driven shaft of the KAMAZ-5320 gearbox. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2023;25(3):79-83. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-79-83>.

Введение. Надежность транспортных и технологических машин агропромышленного комплекса является одним из ключевых факторов обеспечения продовольственной безопасности Российской Федерации [1, 2]. Эффективная техническая диагностика – важный компонент системы технического обслуживания и ремонта, а применение автоматического диагностирования обеспечивает повышение показателей надежности техники [3-5]. Технология контроля механической трансмиссии на основе цифровой термодиагностики предусматривает обеспечение контролепригодности диагностируемых узлов. Приспособленность узла к цифровой термодиагностике обусловлена его расположением, наличием смежных источников тепловыделения, величиной силовых и кинематических нагрузок. При отработке узла на контролепригодность рассчитывают теоретическую величину температуры в зоне трения, определяют зоны, пригодные для измерения диагностической температуры, вычисляют зависимость между упомянутыми температурами, а контроль производят путем сравнения температуры в зоне трения с предельной величиной [6].

Цель исследований: обосновать применение технологии цифровой термодиагностики к диагностированию подшипника 50412 коробки перемены передач автомобиля КАМАЗ-5320.

Материалы и методы. В исследованиях использовались классические методы расчета деталей машин, определения силовых и кинематических характеристик, конечно-элементный анализ стационарной теплопроводности и тепловизионное наблюдение. Материалы исследований – кинематические схемы, чертежи трансмиссии автомобиля КАМАЗ-5320, а также

основные положения технологии контроля механической трансмиссии на основе цифровой термодиагностики.

Результаты и их обсуждение. В технологии контроля механической трансмиссии на основе цифровой термодиагностики используют контактные и бесконтактные датчики температуры, применение которых обеспечивает непрерывный контроль диагностируемого узла. Для диагностирования неподвижных узлов предпочтительно применение контактных датчиков температуры, для выбора места размещения которых целесообразно проводить тепловизионное наблюдение и осуществлять анализ термограмм.

На рисунке 1 представлены фотография (а) и термограмма (б) участка трансмиссии автомобиля КАМАЗ-5320, включающего в себя коробку перемены передач и карданный вал при температуре окружающего воздуха $\Theta_0 = 20,5^\circ\text{C}$.

Анализ термограммы рисунка 1 показывает существенное тепловыделение на поверхности крышки заднего подшипника ведомого вала коробки перемены передач и нагрев поверхности до $40,2^\circ\text{C}$. Показательно, что карданный шарнир в основном нагревается от тепловыделения исследуемого подшипника. Целесообразно контактный датчик температуры монтировать на крышку подшипника, которая является зоной, пригодной для измерения диагностической температуры Θ_D . Ее величина определяется по формуле [7]:

$$\Theta_D = \Theta'_D - \Theta_0, \quad (1)$$

где Θ_D – диагностическая температура, °C; Θ'_D – измеренная температура, °C; Θ_0 – температура окружающего воздуха, °C.

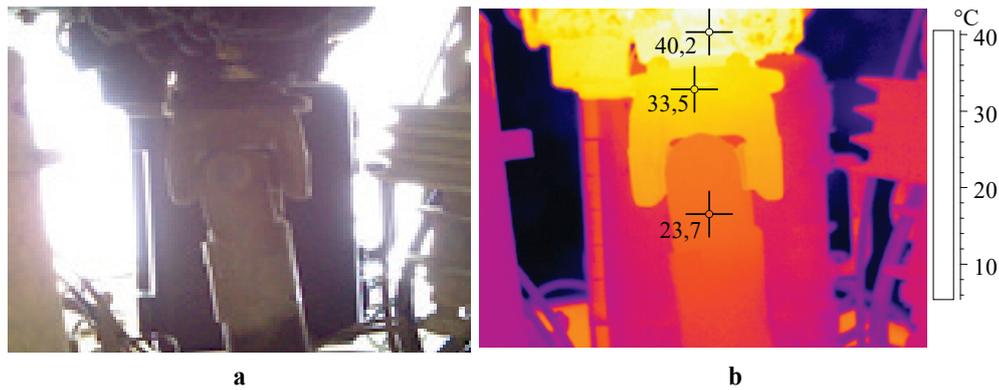


Рис. 1. Фотография (а) и термограмма (b) участка трансмиссии автомобиля КАМАЗ-5320
Fig. 1. Photo (a) and thermogram (b) of the transmission section of the KAMAZ-5320 truck

При отработке узла на применимость технологии цифровой термодиагностики необходимо определить теоретическую величину температуры в зоне трения как функцию от конструктивных, технологических и эксплуатационных параметров, показывающую долю потерь механической энергии на трение и выделение тепла. Эта величина при штатном режиме эксплуатации не должна превышать 215...250°C. Только в случае равенства или приблизительного равенства теоретической и экспериментальной величин температуры в зоне трения можно судить о применимости технологии цифровой термодиагностики к диагностированию конкретного узла. Теоретическая величина температуры в зоне трения зависит от комплекса факторов и определяется по формуле [7]:

$$\Theta_F = \frac{\delta f F \omega}{2h \left(\lambda \sqrt{\frac{2\alpha(h + \pi r)}{\lambda h \pi r}} + k' \rho c \cdot 2,6 \sqrt{\frac{a \omega r}{\lambda_d}} \right)}, \quad (2)$$

где Θ_F – температура в зоне трения, °C; δ – коэффициент распределения теплоты между трущимися телами; f – коэффициент трения; F – нагрузка на подшипник, Н; ω – угловая скорость, с⁻¹; h – длина шипа, м; r – радиус шипа, м; λ – теплопроводность, Вт/м°C; α – коэффициент теплоотдачи поверхности, Вт/м²°C; k' – коэффициент пропорциональности; ρ – плотность материала, кг/м³; c – удельная теплоемкость, Дж/кг °C; a – коэффициент температуропроводности, м²/с; λ_d – длина волны неровностей на трущейся поверхности, м.

Для расчета по формуле (2) используем теплофизические коэффициенты для стали, а геометрические параметры определим, заменив размеры шарикоподшипника 50412 ГОСТ 2893-82 с размерами 60×150×35 мм размерами условной модели подшипника скольжения с длиной шипа $h = 35$ мм и радиусом $r = 52,5$ мм. Для определения радиальной нагрузки и угловой скорости используем результаты теоретического расчета при работе трансмиссии на первой

передаче: крутящий момент на выходном валу – 4598 Нм, частота вращения – 333 мин⁻¹ [8]. Делительный диаметр зубчатого колеса первой передачи выходного вала равен 252 мм, тогда сила, действующая на вал от зубчатого зацепления, –

$$F = \frac{2T}{d \cos \alpha_w} = \frac{2 \cdot 4598}{0,252 \cdot \cos 20^\circ} = 38821 \text{ Н}, \quad (3)$$

где F – сила от зубчатого зацепления, Н; T – крутящий момент на валу, Нм; d – делительный диаметр зубчатого колеса, м; α_w – угол зацепления, град.

На рисунке 2 представлена расчетная схема для определения нагрузки в подшипниковой опоре.

С учетом $F = 38821$ Н и размеров деталей коробки перемены передач определяем нагрузку на подшипник $R_B = 35391$ Н, тогда по формуле (2) $\Theta_F = 184,9^\circ\text{C}$. Полученная температура не превышает допустимую 215...250°C, что позволяет применить технологию цифровой термодиагностики.

Использование поверхности крышки подшипника для установки датчика температуры можно обосновать по условию приблизительного равенства теоретической и экспериментальной величин температуры в зоне трения. Экспериментальное измерение температуры в зоне трения подшипника вызывает

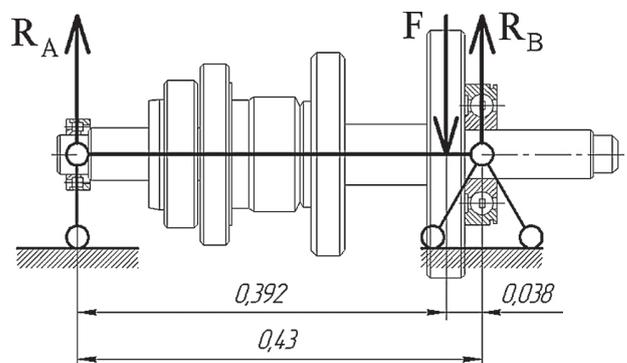


Рис. 2. Схема к расчету нагрузки в подшипниковой опоре

Fig. 2. Diagram of load calculation in a bearing support

существенные затруднения, поэтому можно произвести косвенное измерение на основе зависимости между диагностической температурой и температурой в зоне трения. Определить зависимость между диагностической температурой и температурой в зоне трения позволяет конечно-элементный анализ модели подшипникового узла с расчетом стационарной теплопроводности при использовании библиотеки APM FEM в программе КОМПАС-3D V21. На рисунке 3 представлены результаты проведенного анализа.

В результате многократного моделирования с приложением температуры в зоне трения от 0 до 240°C получен график зависимости между диагностической температурой и температурой в зоне трения, аппроксимация которого линейной функцией

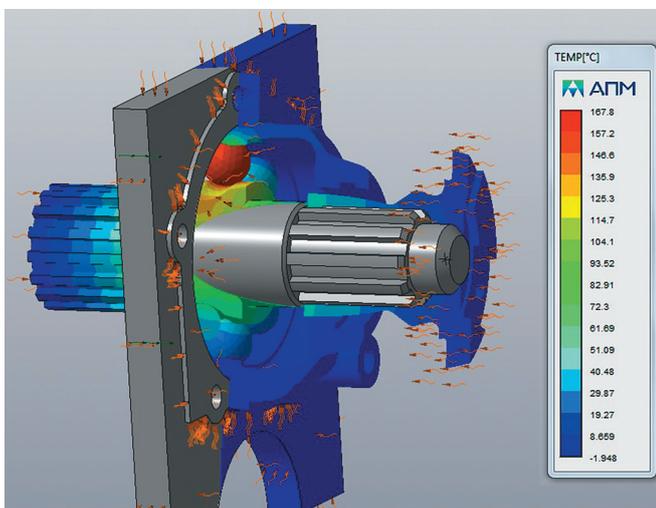


Рис. 3. Карта температурных полей подшипникового узла

Fig. 3. Bearing unit temperature field map

позволила определить величину коэффициента пропорциональности конечно-элементной модели $k = 0,0812$ (рис. 4).

Определим теоретическую величину диагностической температуры с учетом коэффициента пропорциональности конечно-элементной модели:

$$\Theta_D = \Theta_F \cdot k = 184,9 \cdot 0,0812 = 15,0 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (4)$$

Полученный результат показывает, что при теоретическом значении температуры в зоне трения 184,9°C при работе трансмиссии на первой передаче температура поверхности крышки подшипника для установки датчика будет на 15,0°C выше температуры окружающей среды (воздуха).

Обратную задачу решаем с использованием полученного коэффициента пропорциональности конечно-элементной модели и результатов измерения, представленных на рисунке 1. Измеренная температура на поверхности крышки подшипника составляет 40,2°C, тогда с учетом температуры воздуха 20,5°C диагностическая температура составит: $\Theta_D = 40,2 - 20,5 = 19,7^\circ\text{C}$. С учетом коэффициента пропорциональности конечно-элементной модели величина температуры в зоне трения составит: $\Theta_F = 19,7 / 0,0812 = 242,6^\circ\text{C}$. Полученная величина не превышает 250°C, однако может свидетельствовать о предотказном состоянии диагностируемого подшипникового узла.

Исследования, проведенные другими авторами, показали аналогичные результаты как в части применения технологии термодиагностики к контролю технического состояния подшипниковых узлов механических трансмиссий, так и в обосновании критерия безотказного состояния достижения предельной температуры в зоне трения [9-15].

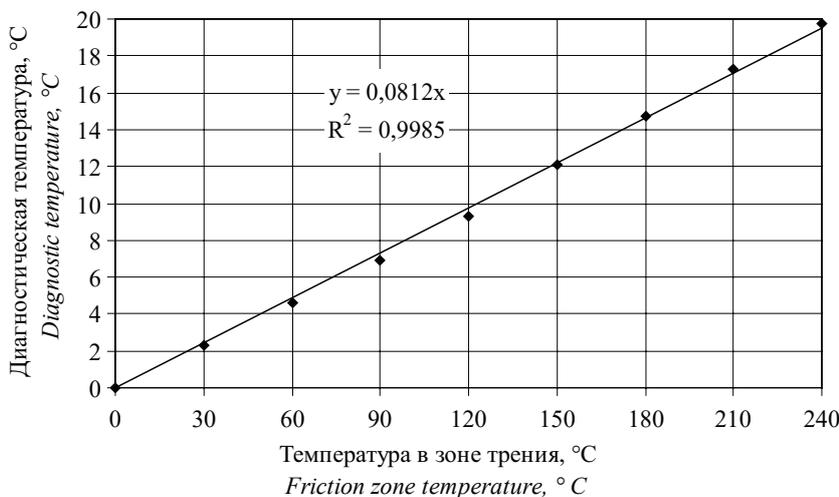


Рис. 4. Определение коэффициента пропорциональности конечно-элементной модели

Fig. 4. Determination of the proportionality coefficient of the finite element model

Выводы

1. Определена теоретическая величина температуры в зоне трения заднего подшипника выходного вала коробки перемены передач 184,9°C при работе трансмиссии на первой передаче.

2. Методом конечно-элементного анализа определен коэффициент пропорциональности 0,0812, связывающий температуру в зоне трения с диагностической температурой на поверхности крышки подшипника.

3. Тепловизионное наблюдение позволило определить температуру в зоне трения (242,6°C) и выявить предотказное состояние диагностируемого подшипника.

4. Результаты исследований обосновывают применение технологии цифровой термодиагностики и установку датчика температуры на поверхности крышки подшипника.

Список использованных источников / References

1. Pastukhov A.G., Timashov E.P. Analytical model of temperature condition elementary interface of the cardan joint. *Traktori i pogonske mašine*. 2018;23(1-2):43-50. EDN: VNXWZA

2. Gabitov I., Negovora A., Nigmatullin S., Kozeev A., Razuarov M. Development of a method for diagnosing injectors of diesel engines. *Komunikacie*. 2021;23(1):B46-B57. <https://doi.org/10.26552/COM.C.2021.1.B46-B57>

3. Ерохин М.Н., Дорохов А.С., Катаев Ю.В. Интеллектуальная система диагностирования параметров технического состояния сельскохозяйственной техники // *Агроинженерия*. 2021. № 2 (102). С. 45-50. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-2-45-50>

Erokhin M.N., Dorokhov A.S., Kataev Yu.V. Intelligent system for diagnosing the parameters of the technical condition of tractors. *Agricultural Engineering*. 2021;2(102):45-50. (In Rus.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-2-45-50>

4. Ли Р.И., Киба М.Р., Быконя А.Н. Исследование трибологических параметров и контактных напряжений в подшипниках качения автомобилей // *Наука в Центральной России*. 2020. № 4(46). С. 76-84. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2020-4-76-84>

Li R.I., Kiba M.R., Bykonya A.N. Research of tribological parameters and contact stresses in automobile rolling bearings. *Science in the Central Russia*. 2020;4(46):76-84. (In Rus.)

5. Ерохин М.Н., Пастухов А.Г., Тимашов Е.П. Оценка износа крестовин шарниров типа CR115, применяемых в тракторах JOHN DEERE // *Труды ГОСНИТИ*. 2017. Т. 126. С. 14-21. EDN: YLPRMP

Erokhin M.N., Pastukhov A.G., Timashov E.P. Evaluating the wear of CR115-type universal joints used in JOHN DEERE tractors. *Trudy GOSNITI*. 2017;126:14-21. (In Rus.)

6. Пастухов А.Г., Тимашов Е.П. Технология термометрического неразрушающего контроля агрегатов механических трансмиссий // *Агроинженерия*. 2020. № 2 (96). С. 33-39. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2020-2-33-39>

Pastukhov A.G., Timashov E.P. Technology for thermometric non-destructive testing of mechanical transmission units. *Agricultural Engineering*. 2020;2(96):33-39. (In Rus.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2020-2-33-39>

7. Pastukhov A., Timashov E., Kravchenko I., Parnikova T. Adaptivity of thermal diagnostics method of mechanical transmission

assemblies. *Engineering for Rural Development*: 19, Jelgava, 2020. Pp. 107-113. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2020.19.TF024>

8. Ляшенко М.В., Соколов-Добрев Н.С., Шеховцов В.В., Потапов П.В., Клементьев Е.В., Долотов А.А. Исследование Изменения КПД трансмиссии в зависимости от условий нагружения // *Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт*. 2016. № 4 (16). С. 11-16. EDN: WMTNYT

Lyashenko M.V., Sokolov-Dobrev N.S., Shekhovtsov V.V., Potapov P.V., Klementiev E.V., Dolotov A.A. Research of transmission efficiency change depending on load modes. *Energy and resource saving: industry and transport*. 2016;4(16):11-16. (In Rus.)

9. Szurgacz D., Zhironkin S., Vöth S., Pokorny J., Spearling A.J.S., Cehlar M., Stempniak M., Sobik L. Thermal imaging study to determine the operational condition of a conveyor belt drive system structure. *Energies*. 2021;14(11):3258. <https://doi.org/10.3390/en14113258>

10. Stempniak M., Zhironkin V., Trzop K., Szurgacz D. Preliminary research to determine the thermal condition of the belt conveyor's drive unit in an underground hard coal mine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;684:012010. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/684/1/012010>

11. Jakubek B., Grochalski K., Rukat W., Sokol H. Thermovision Measurements of rolling bearings. *Measurement*. 2021;189:110512. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110512>

12. Zverev I.A., Maslov A.R. Thermal model of spindles on rolling bearings. *Russian Engineering Research*. 2017;37(3):189-194. <https://doi.org/10.3103/S1068798X17030224>

13. Ivanov A.S., Murkin S.V. Refined working-temperature calculation of gears, taking account of contact thermal conductivity. *Russian Engineering Research*. 2021;41(11):994-998. <https://doi.org/10.3103/S1068798X21110101>

14. Yakovlev S.N., Mazurin V.L. Contact temperature of a cuff and a rotating shaft // *Russian Engineering Research*. 2019;39 (4):279-282. <https://doi.org/10.3103/S1068798X19040191>

15. Pestryakov E.V., Sayapin A.S., Kostomakhin M.N., Petrishchev N.A. Analysis of the technical condition of agricultural machinery using neural networks. *Lecture notes on data engineering and communications technologies*. 2022;121:92-101. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97057-4_9

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила в редакцию 24.01.2023; поступила после рецензирования и доработки 06.04.2023; принята к публикации 06.04.2023

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 24.01.2023; revised 06.04.2023; accepted 06.04.2023