

14. Tikhomirov R.A., Banin V.F., Petukhov E.N., Starikov I.D. et al. Gidrorezanie sudostroitel'nykh materialov [Hydraulic cutting of shipbuilding materials]. Leningrad: Sudostroenie Publ., 1987. 164 p.

15. Kishko A.A., Marchenko A.V. Vozmozhnosti umen'sheniya braka pri gidroabrazivnoi rezke fasonnykh detalei [Possibilities of reduction of defects in abrasive waterjet cutting of formed parts]. *Vysokie tekhnologii v mashinostroenii: materialy Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi internet-konferentsii [High technologies in mechanical engineering: materials of the all-Russian scientific and technical Internet conference]*. In Denisenko A. F. (exec. ed.) Samara: Samara State Technical University Publ., 2016. Pp. 30–32.

16. Barsukov G.V., Zhuravleva T.A., Mikheev A.V. Povyshenie kachestva gidroabrazivnogo rezaniya detalei iz steklotekstolita na osnove predvaritel'nogo diagnostirovaniya sostoyaniya obrabatyvaemogo materiala [Improving the quality of waterjet cutting of parts made of glass fiber based on preliminary diagnostics of the state of the processed material] // *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii [Fundamental and applied problems of engineering and technology]*, 2014. No. 5 (307). Pp. 65–71.

17. Zhuravleva T.A., Barsukov G.V., Korotkii O.A., Sidorov V.B. Razrabotka tekhnologicheskikh rekomendatsii po gidroabrazivnomu rezaniyu steklotekstolita [Development of technological recommendations for hydroabrasive cutting of glass fiber] // *Radiopromyshlennost' [Radio industry (Russia)]*, 2014. No. 4. Pp. 153–165.

### Информация об авторах

**Нозирзода Шодмон Салохидин** – аспирант кафедры промышленных технологий, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, г. Великий Новгород, e-mail: shoni\_1997@mail.ru

### Information about the authors

**Shodmon S. Nozirzoda** – Ph.D. student of the Subdepartment of Industrial Technologies, Yaroslav-the-Wise Novgorod State University, Veliky Novgorod, e-mail: shoni\_1997@mail.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.1(69).43-50

УДК 621.83.06

## Экспериментальная оценка тепловых и шумовых характеристик редуктора со сферической роликовой передачей

Е. С. Лустенкова✉

Белорусско-Российский университет, г. Могилев, Республика Беларусь

✉ fittsova@gmail.com

### Резюме

Передачи с промежуточными телами качения являются инновационной разработкой в области механических приводных систем. Они позволяют реализовывать широкий диапазон передаточных отношений при малых габаритах и массе. Передачи имеют компоновочные преимущества благодаря соосности валов и осевой симметрии основных деталей. Исследуемая сферическая роликовая передача содержит ведущий вал с наклонным участком (кривошипом), на который устанавливается сателлит. В процессе работы передачи сателлит совершает сферическое движение. Один ряд роликов, установленных на сателлите, обкатывается по неподвижной беговой дорожке, образованной сферическими кулачками, закрепленными в корпусе, второй ряд взаимодействует с беговой дорожкой ведомого сферического кулачка, вынуждая его и ведомый вал вращаться с уменьшенной скоростью. В статье приведена кинематическая схема сферической роликовой передачи с двухрядным сателлитом, рассмотрен принцип ее работы. Представлена конструкция экспериментального образца редуктора с передаточным отношением 44, рассмотрена конструкция лабораторного стенда, описаны аппаратные средства и методика испытаний. Приведены результаты экспериментальных исследований тепловых и шумовых характеристик редуктора в зависимости от кинематических и силовых факторов. Данные испытания позволили обнаружить, что термически наиболее нагруженным узлом передачи является ведущий вал с установленным на нем сателлитом, что требует дальнейшего совершенствования его конструкции. Выявлено, что при определенной частоте вращения сферические роликовые передачи по уровню шума сопоставимы с серийно изготавливаемыми зубчатыми мотор-редукторами.

### Ключевые слова

сферическая роликовая передача, редуктор, тело качения, тепловая характеристика, шумовая характеристика, сателлит

### Для цитирования

Лустенкова Е. С. Экспериментальная оценка тепловых и шумовых характеристик редуктора со сферической роликовой передачей / Е. С. Лустенкова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 43–50. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).43-50

### Информация о статье

поступила в редакцию: 17.02.2021, поступила после рецензирования: 20.02.2021, принята к публикации: 25.02.2021

## Experimental estimation of thermal and noise characteristics of a speed reducer with a spherical roller transmission

**E. S. Lustenkova**✉

Belarusian-Russian University, Mogilev, the Republic of Belarus

✉ fittsova@gmail.com

**Abstract**

Transmissions with intermediate rolling elements are an innovative development in the field of mechanical drive systems. They allow you to implement a wide range of transmission ratios with small dimensions and weight. The transmissions have layout advantages due to the alignment of the shafts and the axial symmetry of the main parts. The spherical roller transmission under study contains a drive shaft with an inclined section (crank), on which a pinion is installed. During the transmission operation, the pinion executes a spherical motion. One row of rollers mounted on the pinion is rolled along a stationary racetrack formed by spherical cams fixed in the housing, the second row interacts with the racetrack of the driven spherical cam, forcing it and the driven shaft to rotate with a reduced speed. The article presents a kinematic diagram of a spherical roller transmission with a double-row pinion and considers the principle of its operation. The design of the experimental model of a speed reducer with a transmission ratio of 44 is described, the design of the laboratory bench is considered, the hardware and test methods are described. The results of experimental studies of the thermal and noise characteristics of the speed reducer depending on the kinematic and power factors are presented. These tests allowed us to establish that the most thermally loaded transmission unit is the drive shaft with a pinion mounted on it, which requires further improvement of its design. It is established that at a certain speed of rotation, spherical roller transmissions are comparable in noise level to mass-produced gear motors.

**Keywords**

spherical roller transmission, reduction gear, rolling body, thermal characteristic, noise characteristic, pinion

**For citation**

Lustenkova E.S. Eksperimental'naya otsenka teplovykh i shumovykh kharakteristik reduktora so sfericheskoi rolikovoi peredachei [Experimental evaluation of thermal and noise characteristics of a speed reducer with spherical roller transmission]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2021, No. 1 (69), pp. 43–50. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).43-50

**Article Info**

Received: 17.02.2021, Revised: 20.02.2021, Accepted: 25.02.2021

**Введение**

При проведении ремонтных работ зачастую требуется существенное увеличение усилия, передаваемого от электродвигателя на рабочий орган привода [1]. Это относится и к ручному инструменту, применяемому на производстве. Передачи с промежуточными телами качения являются инновационной разработкой, благодаря соосности валов, малым габаритам и массе они удачно вписываются в цилиндрические корпуса [2–5]. Применение шариков или роликов, перемещающихся по беговым дорожкам, вместо зацепляющихся зубьев колес, позволяет заменить скольжение качением и повысить коэффициент полезного действия (КПД) [6–8]. Эти передачи нашли применение при разработке балонных ключей, лебедок и талей [9–11]. Ключ для демонтажа и сборки резьбовых соединений, крепящих головки блока цилиндров дизельных двигателей тепловозов ЧМЭ-3 (рис. 1), был испытан на разработанном лабораторном стенде и в производственных условиях. В передаче были использованы составные ролики для уменьшения потерь на трение [12].

При производственных испытаниях в локомотивном депо «Могилев» с помощью ключа был реализован момент срыва резьбы 2 000 Н·м при диаметре корпуса 82 мм. Для повышения передаточного отношения были разработаны конструкции сферических роликовых передач (СРП) с двухрядным сателлитом [13].

КПД СРП сопоставим с потерями мощности в червячных передачах, он зависит от геометрии основных элементов, вида смазочного материала и передаточного отношения [14–15]. В связи с тем, что разрабатывались передачи с приводом от электродвигателя, потребовалось исследование дополнительных характеристик. Таким образом, целями испытаний являлись: оценка шумовых характеристик СРП и исследование нагрева редуктора от кинематических и силовых факторов.

Схема и принцип работы передачи, описание объекта испытаний

Схема СРП показана далее (рис. 2). Передача содержит ведущий вал 1 с наклонным участком (кливошипом) 2. Установка эксцентриковой втулки на ведущий вал обеспечивает этот наклон. На кливошипе установлен составной сателлит 3 с возможностью относительного вращения, который содержит наружную 4 и внутреннюю 5 поверхности с равномерно распределенными отверстиями. В эти отверстия установлены два ряда роликов 6, 7. Первый из них контактирует своими поверхностями сферической формы с замкнутой беговой дорожкой 8, которая образована двумя неподвижными сферическими кулачками, закрепленными в корпусе 9. Ряд роликов 7 контактирует с беговой дорожкой 10 ведомого сферического кулачка 11, соединенного с ведомым валом 12.

Ведущий и ведомый валы имеют общую ось вра-

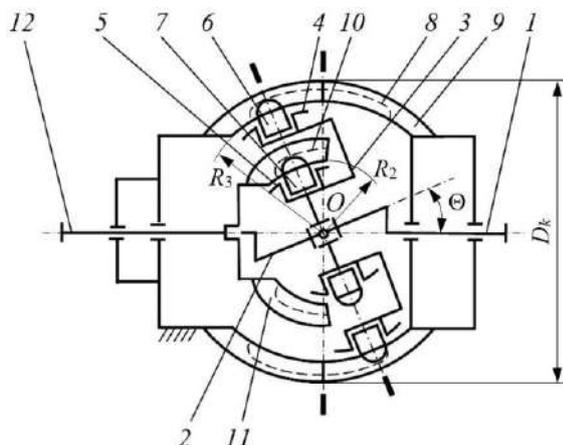


**Рис. 1.** Ключ для демонтажа и сборки резьбовых соединений, крепящих головки блока цилиндров дизельного двигателя тепловоза ЧМЭЗ:  
*a* – детали передачи; *б* – передача в сборе; *в* – испытания на лабораторном стенде; *г* – производственные испытания

**Fig. 1.** Wrench for dismantling and assembling the threaded connections securing the cylinder heads of the diesel engine of the diesel locomotive CME3 (CSD type, T669 series):

*a* – transmission parts; *b* – transmission assembly; *c* – tests on a laboratory bench; *d* – field tests

щения, которая является и осью передачи.



**Рис. 2.** Кинематическая схема сферической роликовой передачи с двухрядным сателлитом

**Fig. 2.** Kinematic diagram of spherical roller transmission with a double-row pinion

Оси всех роликов 6, 7 лежат в одной плоскости. Проходящая через центр сферического движения  $O$  сателлита плоскость перпендикулярна оси передачи и является экваториальной плоскостью для всех сферических кулачков.

При вращении ведущего вала наклон его криво-

шипа вынуждает совершать сферическое движение (регулярную прецессию) относительно центра  $O$  [16]. Ролики, вращаясь в отверстиях сателлита, обкатываются по неподвижной беговой дорожке и по беговой дорожке ведомого сферического кулачка, вынуждая его поворачиваться вместе с ведомым валом с измененной скоростью.

Основными параметрами сферической роликовой передачи являются радиусы сферических поверхностей  $R_3$  и  $R_2$ , где располагаются центры сферических концов роликов первого и второго рядов соответственно, а также угол наклона кривошипа  $\Theta$ .

Передаточное отношение исследуемой СРП определяется числом периодов (волн)  $Z_3$  неподвижной беговой дорожки 8 и числом периодов  $Z_2$  беговой дорожки (кулачкового профиля) 10 сферического ведомого кулачка. Его можно вычислить по формуле

$$i = \frac{(Z_3 + 1) \cdot Z_2}{Z_2 - Z_3}. \quad (1)$$

### Исследование температурных характеристик сферической роликовой передачи

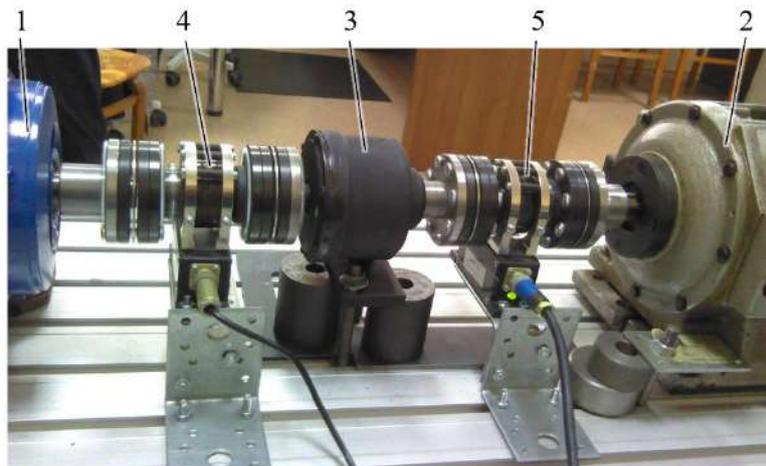
Объектом испытаний стал экспериментальный образец редуктора со сферической роликовой передачей с двухрядным сателлитом (рис. 3). В качестве смазочного материала применялась графитовая смазка для ШРУСов (Mannol), закладываемая при сборке.



**Рис. 3.** Экспериментальный образец редуктора со сферической роликовой передачей с двухрядным сателлитом:

*a* – основные узлы испытываемого редуктора (1 – ведущий вал с установленным сателлитом с двумя рядами роликов; 2 – ведомый вал с кулачком; 3 – наружные кулачки, образующие неподвижную беговую дорожку; 4 – корпус); *б* – экспериментальный образец редуктора в сборе

**Fig. 3.** Experimental model of a speed reducer with spherical roller transmission with a double-row pinion:  
*a* – main parts of the speed reducer for testing (1 – drive shaft with installed satellite with two rows of rollers; 2 – driven shaft with a cam; 3 – outer cams, forming a stationary racetrack; 4 – housing);  
*b* – assembly of the experimental model of the speed reducer



**Рис. 4.** Экспериментальный образец редуктора на стенде:

1 – электродвигатель; 2 – порошковый тормоз (нагрузатель); 3 – испытываемый редуктор; 4, 5 – датчики момента и частоты вращения

**Fig. 4.** Experimental model of the speed reducer on the testing bench:

1 – electric motor; 2 – powder brake (loader); 3 – testing speed reducer; 4, 5 – torque and speed sensors

Редуктор имеет передаточное отношение  $i_{12}^{(3)} = -44$  ( $Z_2 = 11$ ,  $Z_3 = 15$ ), максимальный диаметр корпуса 82 мм.

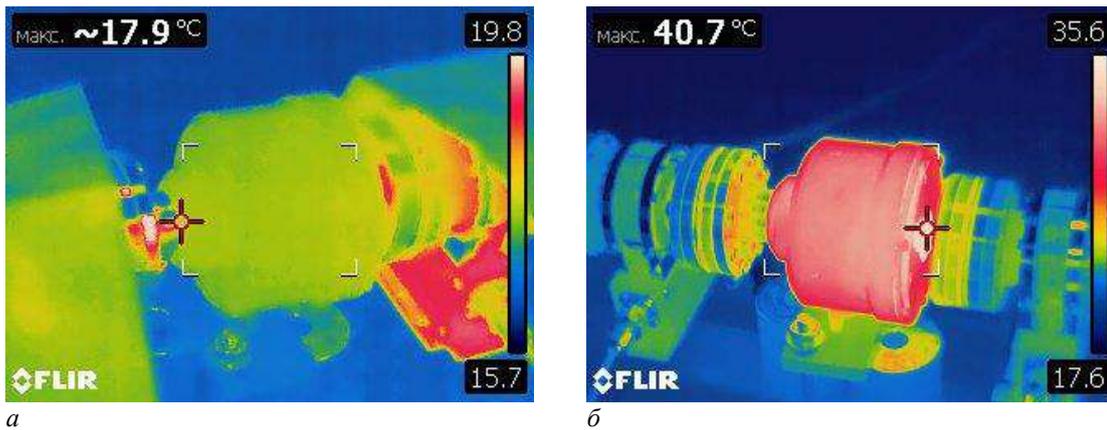
Исследование производилось на стенде, работающем по методу разомкнутого силового потока (рис. 4).

Частота вращения двигателя регулировалась частотным преобразователем, нагрузатель также имел собственную систему управления.

Измерение температуры корпуса редуктора осуществлялось посредством тепловизора (модель FLIR T440), оснащенного контактным зондом [17].

Были заданы следующие параметры: частота вращения на ведущем валу  $n_1 = 1000 \text{ мин}^{-1}$  и момент на ведомом валу  $T_2 = 10 \text{ Н} \cdot \text{м}$  (режим близкий к номинальному). Показаны начальная и конечная термограммы (рис. 5).

В начальный момент времени (время первого измерения) максимальная температура на ведущем



а

б

Рис. 5. Термограмма редуктора:

а – при пуске редуктора (время работы – 1 мин.); б – после работы в течение 20 мин.

Fig. 5. Speed reducer thermogram:

а – when starting the reducer (operating time – 1 min); б – after 20 min of operation

валу составляла 19 °С. Температура корпуса – 17 °С. В конечный момент времени максимальная температура на ведущем валу – 40 °С. Температура корпуса составляла 35 °С. Время эксперимента ограничивалось 20 мин, так как редуктор был предусмотрен для кратковременных интервалов нагружений в режиме частых пусков / остановок (в составе электромеханического привода домкрата). Для работы в постоянном режиме в течение нескольких часов (смены) необходима циркуляционная система смазки, масляная ванна. В данном образце смазка закладывалась при сборке.

Термограммы определялись через определенные временные промежутки работы редуктора, что позволило построить графики (рис. 6).

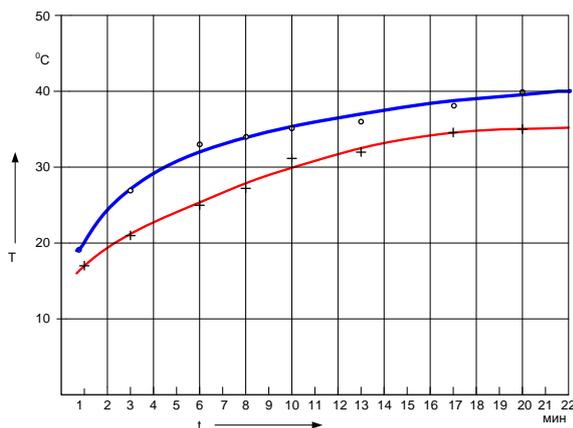


Рис. 6. Зависимость изменения температуры элементов редуктора от времени работы:

○ – температура ведущего вала;

+ – температура корпуса редуктора

Fig. 6. Dependence of the temperature variation of the speed reducer elements on the operating time:

○ – the temperature of the drive shaft;

+ – the temperature of the speed reducer housing

Из графиков (см. рис. 6) можно установить, что наибольшей тепловой нагрузке подвержен ведущий узел СРП – вал, на котором установлен сателлит. С течением времени наблюдается стабилизация температурных характеристик в связи с достижением теплового баланса.

#### Исследование шумовых характеристик сферических роликовых передач

Измерение уровня шума в процессе работы редуктора производилось с помощью цифрового шумомера (модель «Testo 816-1»).

Результаты экспериментов для анализа шумовых характеристик СРП (в составе мотор-редуктора) приведены далее (табл. 1). Шумомер модели «Testo 816-1» имеет класс точности 2. Уровень звука определялся в диапазоне 30–100 дБ, режим Slow. Регистрация данных осуществлялась с периодичностью 1 с на расстоянии 1 м от редуктора с двигателем, установленного на стенде для определения КПД. В таблицу заносились средние арифметические значения по пяти значениям, определяемым в интервале 5 с.

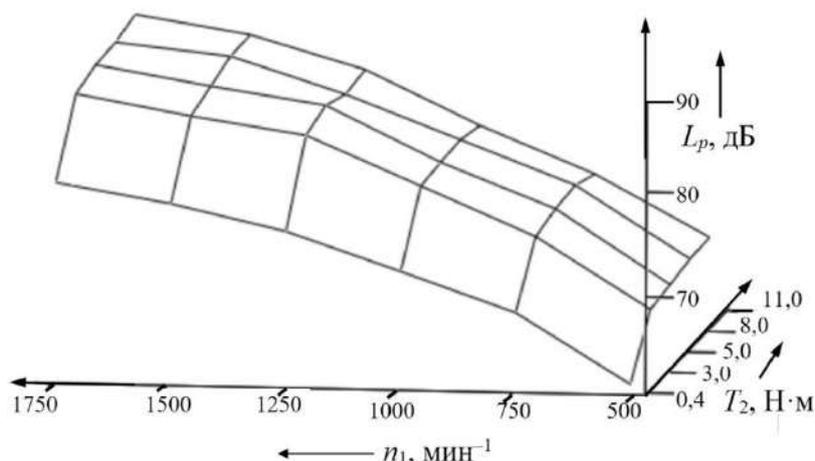
Анализ приведенных данных свидетельствует о повышении уровня шума при возрастании передаваемой мощности (частоты вращения валов и моментов).

Следует отметить, что при частотах вращения ведущего вала  $n_1 = 750 \text{ мин}^{-1}$  и  $n_1 = 1000 \text{ мин}^{-1}$  при увеличении момента на ведомом валу  $T_2$  от 8 Н·м до 11 Н·м (достижения номинального значения) наблюдалось некоторое снижение уровня шума, что объясняется выходом на оптимальный режим, подборкой зазоров под нагрузкой. При частоте  $n_1 = 1250 \text{ мин}^{-1}$  также наблюдался максимум уровня шума при увеличении момента и его последующее снижение.

Показано распределение данных  $L_p$  в плоскости  $n_1 T_2$ , позволяющее оценить степень влияния указанных параметров (рис. 7).

**Табл. 1.** Результаты экспериментов по исследованию уровня шума  
**Table 1.** Results of the noise level experimental analysis

$T_2$ , Н·м	Уровень шума $L_p$ , дБ					
	$n_1 =$ $= 500 \text{ мин}^{-1}$	$n_1 =$ $= 750 \text{ мин}^{-1}$	$n_1 =$ $= 1\,000 \text{ мин}^{-1}$	$n_1 =$ $= 1\,250 \text{ мин}^{-1}$	$n_1 =$ $= 1\,500 \text{ мин}^{-1}$	$n_1 =$ $= 1\,750 \text{ мин}^{-1}$
0,4	61,4	68,0	71,7	75,3	77,7	79,5
3	66,6	73,3	77,9	82,5	84,1	86,0
5	67,0	74,0	78,2	83,4	85,0	86,8
8	67,5	74,3	78,4	82,5	85,9	87,0
11	67,6	73,4	77,8	82,9	86,0	87,7



**Рис. 7.** Результаты испытаний мотор-редуктора со сферической роликовой передачей по определению его шумовых характеристик

**Fig. 7.** Results of motor-reducer with spherical roller transmission testing for its noise characteristics estimation

Передаваемая мощность изменялась от 0,5 Вт до 46 Вт. В табл. приведены значения звукового давления  $L_p(1)$ . Для перевода этих значений в звуковую мощность  $L_w$  использовалась формула

$$L_w = L_p(L_u) + \lg(4 \cdot \pi \cdot L_u^2), \quad (2)$$

где  $L_u$  – расстояние от редуктора до микрофона шумомера, м.

В справочнике [18] указано, что у мотор-редукторов с передаваемой мощностью до 1,5 кВт и частотой вращения ведущего вала  $n_1 = 1\,500 \text{ мин}^{-1}$  звуковая мощность не должна превышать диапазон 70–84 дБ(А) в зависимости от средних геометрических частот октавных полос. Корректированный уровень звуковой мощности не должен превышать 86 дБА.

Таким образом эксперименты показали, что испытываемый образец редуктора в составе электро-механического привода с асинхронным электродвигателем при определенных частотах вращения и передаваемых моментах соответствует требованиям

по уровню шума, предъявляемым к промышленным образцам мотор-редукторов.

### Заключение

Экспериментальный анализ тепловых характеристик СРП позволил установить, что наибольшее температурное нагружение испытывает узел ведущего вала СРП, включающий сам вал, эксцентрик и сборный двухрядный сателлит, установленный на подшипниках качения.

Результаты экспериментов по оценке уровня шума показали, что для испытываемого редуктора при частоте вращения ведущего вала  $n_1 = 1\,500 \text{ мин}^{-1}$  и передаваемом моменте, не превышающем 11 Н·м, уровень шума находится в диапазоне 78–86 дБ, что по значениям корректированного уровня звуковой мощности соответствует требованиям, предъявляемым к серийно изготавливаемым мотор-редукторам с зубчатыми передачами, детали которых изготовлены согласно 8 и 9 степеням точности, мощность двигателя которых не превышает 1,5 кВт.

### Список литературы

1. Коробко Г.И., Лебедев В.В. Автоматизированные электроприводы объектов водного транспорта. Нижний Новгород : Изд-во ВГУВТ, 2016. 32 с.
2. Становской В.В., Ремнева Т.А., Казакивичус С.М. Передачи со свободными телами качения, обзор патентной литературы // Прогрессивные зубчатые передачи : сб. науч. тр. Новоуральск : Новоурал. гос. технолог. ин-т, 2003. С. 61–94.
3. Игнатищев Р.М. Синусошариковые редукторы. Минск : Вышэйшая школа, 1983. 107 с.

4. Terada H., Masuda T., Yoshida S. Motion Analysis of a Reciprocating Motion Type Ball Reducer // Proc. 12th IFToMM World Congress. Besançon, 2007. P. 414–418.
5. Bara M. Designing Aspects Of Cylindrical Transmission // ASME Conf. Proc. Chicago, 2006. P. 75–81.
6. Лустенков М.Е. Передачи с промежуточными телами качения: определение и минимизация потерь мощности. Могилев : Изд-во Белорус.-Рос. ун-т, 2010. 274 с.
7. Лустенков М.Е. Определение КПД передач с составными промежуточными телами качения // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2014. № 6. С. 13–19.
8. Nam W.K., Shin J.W., Oh S.H. Design of thin plate-type speed reducers using balls for robots // Journal of Mechanical Science and Technology. 2013. № 27. P. 519–524.
9. Лустенков М.Е. Ключ для демонтажа ведущих колес грузовых автомобилей ЗИЛ и ГАЗ // Автомобильная промышленность. 2003. № 5. С. 24–25.
10. Борисенко Л.А. Малогабаритные передаточные механизмы для мехатронных устройств. Могилев : Изд-во Белорус.-Рос. ун-т, 2013. 187 с.
11. Панкратов Э.Н., Шумский В.В., Лушников С.В. Волновые редукторы с промежуточными звеньями // Бурение и нефть. 2003. № 2. С. 26–27.
12. Сазонов И.С., Лустенков М.Е., Прудников А.П., Фитцова Е.С. Методология расчета и проектирования передач с составными промежуточными телами качения // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. 2014. № 2 (43). С. 60–70.
13. Лустенков М.Е., Лустенкова Е.С. Оценка кинематических возможностей и КПД сферической и роликовой передач // Вестник машиностроения. 2019. № 3. С. 25–28.
14. Лустенков М.Е., Лустенкова Е.С. Сферическая роликовая передача с двухрядным сателлитом: силовые расчеты и определение КПД // Вестн. Брян. гос. техн. ун-та. 2019. № 5. С. 32–43.
15. Efremenko E.A., Bonnard E. Power Parameters Automated Calculation for Transmission with Intermediate Rolling Bodies and Free Cage // IOP Conf. Series : materials Science and Engineering. 2020. Vol. 795. 6 p.
16. Molyneux W.G. The internal bevel gear and its applications // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering. 1997. № 211 (1). P. 39–61.
17. Prudnikov A.P. Thermal analysis of transmission with intermediate rolling bodies // AER-Advances in Engineering Research. 2018. Vol. 158. P. 338–342.
18. Анурьев В.И. Справочник конструктора машиностроителя. М. : Машиностроение, 2001. Т. 3. 864 с.

### References

1. Korobko G.I., Lebedev V.V. Avtomatizirovannye elektroprivody ob"ektov vodnogo transporta [Automated electric drives of water transport facilities], Nizhnii Novgorod, 2016, 32 p.
2. Stanovskoi V.V., Remneva T.A., Kazakyavichus S.M. Peredachi so svobodnymi telami kacheniya, obzor patentnoi literatury [Free rolling body gears, a patent literature review]. *Progressivnye zubchatye peredachi [Progressive gears]*, Novoural'sk, 2003. Pp. 61–94.
3. Ignatichiev R.M. Sinusosharikovye reduktory [Sinus ball reducers], Minsk, 1983, 107 p.
4. Terada H., Masuda T., Yoshida S. Motion Analysis of a Reciprocating Motion Type Ball Reducer. Proc. 12th IFToMM World Congress, Besançon, 18–21 June 2007, Besançon, 2007. Pp. 414–418.
5. Bara M. Designing Aspects Of Cylindrical Transmission. *ASME Conf. Proc., 5–10 Nov 2006*, Chicago, Illinois, 2006. Pp. 75–81.
6. Lustenkov M.E. Peredachi s promezhutochnymi telami kacheniya: opredeleniye i minimizatsiya poter' moshchnosti [Transmission with intermediate rolling elements: determining and minimizing power losses], Mogilev, 2010, 274 p.
7. Lustenkov M.E. Opredeleniye KPD peredach s sostavnymi promezhutochnymi telami kacheniya [Determination of the efficiency of gears with composite intermediate rolling bodies]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie [Proceedings of higher educational institutions. Mechanical engineering]*, 2014. No. 6. Pp. 13–19.
8. Nam W.K., Shin J.W., Oh S.H. Design of thin plate-type speed reducers using balls for robots // *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2013. No. 27. Pp. 519–524.
9. Lustenkov M.E. Klyuch dlya demontazha vedushchikh kolyos gruzovykh avtomobiley ZIL i GAZ [Key for disassembling the driving wheels of ZIL and GAZ trucks]. *Avtomobil'naya promyshlennost' [Automotive industry]*, 2003. No. 5. Pp. 24–25.
10. Borisenko L.A. Malogabaritnye peredatochnye mekhanizmy dlya mekhatronnykh ustroystv [Compact gears for mechatronic devices]. Mogilev, 2013. Pp. 187.
11. Pankratov E.N., Shumskiy V.V., Lushnikov S.V. Volnovye reduktory s promezhutochnymi zven'yami [Wave reducers with intermediate links]. *Burenije i nef't' [Drilling and oil]*, 2003. No. 2. Pp. 26–27.
12. Sazonov I.S., Lustenkov M.E., Prudnikov A.P., Lustenkova E.S. Metodologiya rascheta i proektirovaniya peredach s sostavnymi promezhutochnymi telami kacheniya [Methodology for calculating and designing gears with composite intermediate rolling bodies]. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta [Bulletin of the Belarusian-Russian University]*, 2014. No. 2(43). Pp. 60–70.
13. Lustenkov M.E., Lustenkova E.S. Otsenka kinemateskikh vozmozhnostey i KPD sfericheskoi i rolikovoi peredach [Evaluation of kinematic capabilities and efficiency of spherical and roller gears]. *Vestnik mashinostroi eniya [Mechanical Engineering Bulletin]*, 2019. No. 3. Pp. 25–28.
14. Lustenkov M.E., Lustenkova E.S. Sfericheskaya rolikovaya peredacha s dvukhryadnym satelлитом: silovye raschety i opredeleniye KPD [Spherical Roller Transmission with a Double-Row Pinion: power calculations and determination of efficien-

cy]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of Bryansk State Technical University]*, 2019. No. 5. Pp. 32–43.

15. Efremenkov E.A., Bonnard E. Power Parameters Automated Calculation for Transmission with Intermediate Rolling Bodies and Free Cage. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020. Vol. 795. 6 p.

16. Molyneux W.G. The internal bevel gear and its applications. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 1997. No. 211(1). Pp. 39–61.

17. Prudnikov A.P. Thermal analysis of transmission with intermediate rolling bodies. *AER-Advances in Engineering Research*, 2018. Vol. 158. Pp. 338–342.

18. Anur'ev V.I. *Spravochnik konstruktora mashinostroitel'ya [Mechanical Engineer Designer Handbook]*, Moscow, 2001. Vol. 3. Pp. 671.

#### Информация об авторах

*Лустенкова Екатерина Сергеевна* – старший преподаватель кафедры основ проектирования машин, Белорусско-Российский университет, г. Могилев, Республика Беларусь, e-mail: [fittsova@gmail.com](mailto:fittsova@gmail.com)

#### Information about the authors

*Ekaterina S. Lustenkova* – Senior Lecturer of the Subdepartment of Fundamentals of Machine Design, Belarusian-Russian University, Mogilev, the Republic of Belarus, e-mail: [fittsova@gmail.com](mailto:fittsova@gmail.com)

DOI 10.26731/1813-9108.2021.1(69).50-57

УДК 621.331

## Определение технического состояния трансформаторов собственных нужд при построении системы мониторинга цифровой тяговой подстанции

О. А. Сидоров✉, В. Л. Незевак, В. М. Филиппов

*Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Российская Федерация*

✉ [egt@omgups.ru](mailto:egt@omgups.ru)

#### Резюме

В статье рассматриваются аспекты определения технического состояния трансформаторов собственных нужд при создании системы мониторинга технического состояния оборудования цифровой тяговой подстанции. На техническое состояние силового оборудования оказывают влияние климатические, эксплуатационные и технологические факторы. Современные системы мониторинга технического состояния силового оборудования на основании измерений на работающем оборудовании обеспечивают его устойчивую работу, сигнализируют о критических отклонениях показателей работы и оценивают прогнозный ресурс работы. При диагностических измерениях трансформаторов собственных нужд предложено проводить измерения следующих показателей работы и параметров: нагрузка и уровень напряжения (со стороны ВН); температура верхних слоев масла; уровень масла; шум и вибрации бака; влагосодержание масла; внешний вид основных узлов (проверка целостности). Анализ данных измерений при определении технического состояния трансформаторов собственных нужд включает в себя ретроспективный анализ изменения данных испытаний при техническом обслуживании, данных измерений в рабочем режиме, уровня и скорости изменения диагностических данных. Оценка и прогноз технического состояния трансформаторов осуществляются в рамках предлагаемой экспертной системы, учитывающей данные испытаний и измерений диагностических параметров и электрических величин. Рассмотренная система мониторинга технического состояния трансформаторов собственных нужд тяговых подстанций входит в единую систему мониторинга состояния оборудования, построение которой связано с проектом цифровой тяговой подстанции. Предлагаемые решения соответствуют концепции перехода к системе технического обслуживания по текущему состоянию, повышению надежности работы оборудования и предотвращению аварийных событий.

#### Ключевые слова

тяговая подстанция, трансформатор собственных нужд, техническое состояние трансформатора, прогнозный ресурс работы, диагностические параметры, нормативные требования, цифровая тяговая подстанция

#### Для цитирования

Сидоров О.А. Определение технического состояния трансформаторов собственных нужд при построении системы мониторинга цифровой тяговой подстанции / О. А. Сидоров, В. Л. Незевак, В. М. Филиппов // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.* – 2021. – № 1 (69). – С. 50–57. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).50-57

#### Информация о статье

поступила в редакцию: 11.02.2021, поступила после рецензирования: 23.02.2021, принята к публикации: 26.02.2021

## Determination of the technical condition of auxiliary transformers when building a monitoring system for a digital traction substation