

УДК 621.833.6

DOI: 10.22213/2413-1172-2019-3-26-32

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ В ПЛАНЕТАРНЫХ ПЕРЕДАЧАХ С РОЛИКОВЫМ МЕХАНИЗМОМ ПЕРЕДАЧИ МОМЕНТА

И. А. Пушкарев, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Л. П. Перминов, соискатель, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

И. В. Кузнецов, ООО «Альфа», Сарапул, Россия

А. Э. Пушкарев, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Приведены результаты экспериментального исследования планетарных передач типа $k-h-v$ с цилиндрическими роликами механизма передачи момента с сателлита.

Динамические реакции в данной передаче определяются тремя факторами: наличием эксцентриситета водила, движением роликов в передаче и колебательными процессами. Эксцентриситет вызывает появление центробежного момента инерции относительно оси вращения водила. Нахождение центробежных моментов инерции в связи с постоянным движением роликов затруднено. Движение роликов должно проявиться в возрастании динамических реакций через определенный период, связанный с передаточным отношением от водила к сателлитам, что требуется подтвердить экспериментально.

Описан экспериментальный комплекс, связанный с персональным компьютером. Экспериментальный стенд предоставляет возможность варьировать угловой скоростью вала электродвигателя, фиксировать и обрабатывать показания тензодатчиков, используя соответствующее программное обеспечение.

Исследовано влияние роликов планетарной передачи на изменение динамических реакций при разных частотах двигателя. Сделаны выводы о рациональном изменении конструкции роликос зубчатой передачи с целью снижения динамических реакций в планетарном механизме с роликосым механизмом передачи момента.

Выполнение рекомендаций дает возможность использовать планетарную роликос зубчатую передачу также и на высоких скоростях вращения.

Ключевые слова: планетарная передача, динамика, реакции, ролик, механизм.

Введение

Планетарные передачи ввиду своих преимуществ используются в разнообразных областях народного хозяйства. Распределение нагрузки по сателлитам повышает нагрузочную способность планетарной передачи по сравнению с передачами с неподвижными осями [1, 2]. Предложены новые, усовершенствованные конструкции планетарных передач со звеньями пониженной жесткости [3, 4], что дает возможность более равномерно распределить нагрузку по сателлитам [5–7]. Здесь могут возникнуть повышенные напряжения [8] и колебательные явления [9–12]. Значительно меньше число публикаций посвящено экспериментальному исследованию планетарных передач [13, 14].

Планетарные передачи $k-h-v$ с одним внутренним зацеплением по классификации профессора Кудрявцева В. Н. имеют много преимуществ и перспектив использования, но их применение ограничивает наличие механизма передачи момента. В работе [15] предложен роликосый механизм передачи момента. Структура

планетарной передачи с таким механизмом проще, чем с рычажным механизмом, к тому же передача имеет значительно больший КПД по сравнению с цевочным механизмом. В цевочном механизме элементы кинематической пары скользят друг относительно друга, а ролики перекатываются по внутренним поверхностям отверстий дисков и сателлитов без скольжения. Несмотря на перспективность роликосой планетарной передачи, она мало представлена в опубликованных исследованиях.

В работе [16] исследуется структура планетарных передач с роликосым механизмом передачи момента. Установлен механизм, состоящий из групп Ассур, который заменяет данный механизм; определен радиус centroиды ролика в относительном движении. Выведены выражения для нормальных реакций, действующих на ролики со стороны сателлитов и дисков. В статье [17] рассматриваются нагрузочная способность и КПД роликос зубчатой передачи, определена взаимосвязь КПД от нагрузочных характеристик. Найденный в эксперименте КПД превышает 93 %. В работе [18] анализируется

жесткость кинематических пар сателлит – ролик и диск – ролик, и определен коэффициент податливости k при одинаковых и разных соотношениях диаметров сопрягаемых звеньев ($k = 1,8$ и $k = 4$). В этой же работе приведены результаты экспериментального исследования этой передачи на вибрационные характеристики. В установившемся режиме найдены вероятностные параметры виброскорости, по значениям которых планетарный роликозубчатый механизм находится в зоне B вибрационного состояния и согласно ГОСТ ИСО 10816-1-97 может эксплуатироваться неограниченное время.

Цель данной работы – экспериментальное исследование добавочных динамических реакций и влияния на них роликов планетарной передачи с роликовым механизмом передачи момента.

Динамические реакции планетарной передачи с роликовым механизмом передачи момента

Из теорем об изменении количества движения и момента количества движения, исключая так называемые статические реакции, обусловленные внешними силами, определяются добавочные динамические реакции X_A, X_B, Y_A, Y_B (рис. 1):

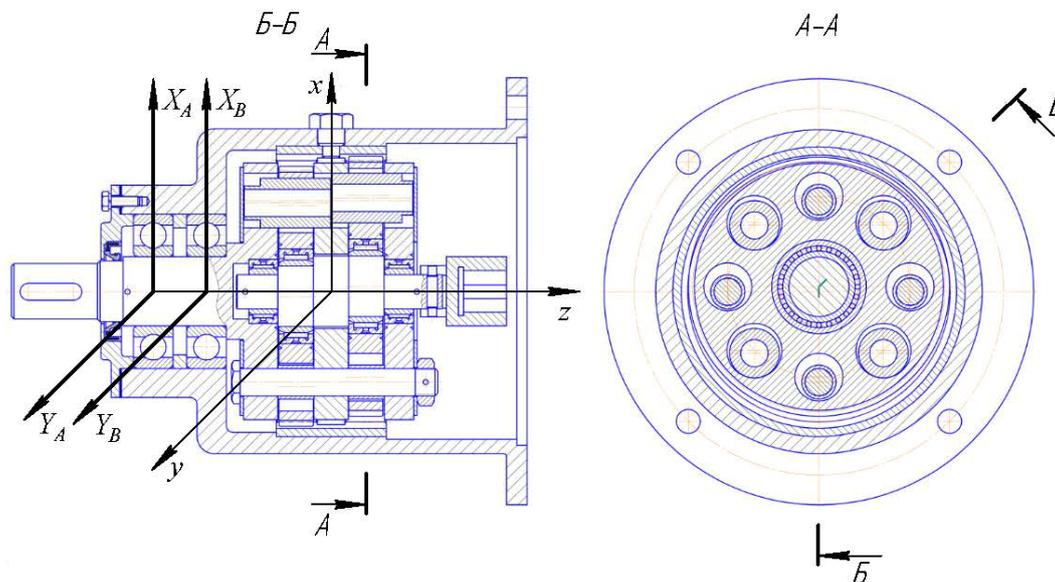


Рис. 1. Планетарная передача с роликовым механизмом передачи момента

Fig. 1. Planetary gear with roller torque absorption mechanism

Нахождение центробежных моментов инерции в связи с постоянным движением роликов затруднено. Можно указать, что влияние движения роликов на динамические реакции будет проявляться в их возрастании через определенный период, связанный с передаточным отношением от водила к сателли-

$$\begin{aligned}
 -m y_c \ddot{\phi} - m x_c \dot{\phi}^2 &= X_A + X_B; \\
 m x_c \dot{\phi} - m y_c \dot{\phi}^2 &= Y_A + Y_B; \\
 -I_{xz} \ddot{\phi} + I_{yz} \dot{\phi}^2 &= -z_A Y_A - z_B Y_B; \\
 -I_{yz} \ddot{\phi} + I_{xz} \dot{\phi}^2 &= z_A Y_A + z_B Y_B.
 \end{aligned}$$

Здесь m – масса подвижной части; $\ddot{\phi}$ – угловое ускорение; $\dot{\phi}$ – угловая скорость. Центробежные моменты инерции I_{xz}, I_{yz} в данной конструкции не равны нулю из-за эксцентриситета водила. Координаты центра масс x_c, y_c , а также центробежные моменты инерции I_{xz}, I_{yz} являются переменными из-за движения роликов. Но это движение совершается с частотой, меньшей частоты вращения водила в i раз, где i – передаточное отношение. Поэтому влияние на добавочные динамические реакции в подшипниках движение роликов должно оказывать в i раз меньше на переходных режимах (при наличии углового ускорения) и в i^2 раз меньше в установившемся движении, чем от вращения водила.

там, что требуется подтвердить экспериментально.

Другая причина появления динамических реакций – колебательные процессы в планетарной передаче. В этом случае в связи с резонансными явлениями величина реакций неоднозначно связана с частотой вращения водила.

Экспериментальное оборудование и проведение эксперимента

Зубчатые планетарные передачи типа с роликовым механизмом передачи момента испытывались на экспериментальном редукторе (рис. 2). Его характеристики следующие:

- передаточное отношение $i = 50$;
- модуль зацепления $m = 1,5$ мм;
- угол зацепления $\alpha_w = 50^\circ$;
- число сателлитов $n_w = 2$;
- число зубьев сателлита $z_g = 100$;
- число зубьев неподвижного колеса $z_b = 102$;
- диаметр окружности выступов сателлита $d_{ag} = 152,7$ мм;
- диаметр окружности выступов неподвижного колеса $d_{ab} = 153$ мм;
- эксцентриситет $a_w = 2,19$ мм;
- ширина венца сателлита $b_{wg} = 20$ мм;
- ширина венца неподвижного колеса $b_{wb} = 24$ мм;

- диаметр ролика $d_p = 29,8$ мм;
- число роликов $n_p = 8$;
- подшипники валика 4074904 ГОСТ 4657–82;
- подшипники сателлитов 4074907 ГОСТ 4657–82;
- подшипники выходного вала 308 ГОСТ 8338–75.

Эксперименты проводились на стенде, предоставляющем возможность варьировать угловой скоростью вала электродвигателя, фиксировать и обрабатывать показания тензодатчиков, используя соответствующее программное обеспечение.

Основные структурные элементы механической части экспериментального стенда (рис. 3): 1 – асинхронный электродвигатель АИРМ90L4У3; 2 – быстроходный вал; 3 – экспериментальный редуктор с роликовым механизмом передачи момента; 4 – тензодатчик; 5 – пластина.



Рис. 2. Экспериментальный роликовый механизм передачи момента

Fig. 2. Experimental roller torque absorption mechanism

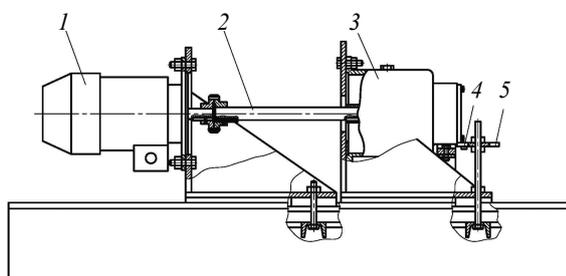


Рис. 3. Механическая часть экспериментального стенда

Fig. 3. Mechanical part of the experimental bench

В экспериментальный комплекс входят: экспериментальный редуктор с роликовым механизмом

передачи момента; асинхронный электродвигатель; преобразователь частоты Prostar PR-6000; тензостанция ZET A17-T8; компьютер; рама (рис. 4). На раме базируется механическая часть экспериментального стенда. Двигатель ИРМ90L4У3 имеет мощность 2,2 кВт и максимальную частоту вращения вала 1500 об/мин. Требуемая частота устанавливается с помощью преобразователя PR-6000. Тензостанция ZET A17-T8 позволяет фиксировать одновременно восемь тензосигналов. Она связана с компьютером, на котором предустановлена программа ZETLab, предназначенная для обработки сигналов с тензодатчиков.

Эксперименты проводились на разных частотах вращения двигателя (рис. 5, 6).

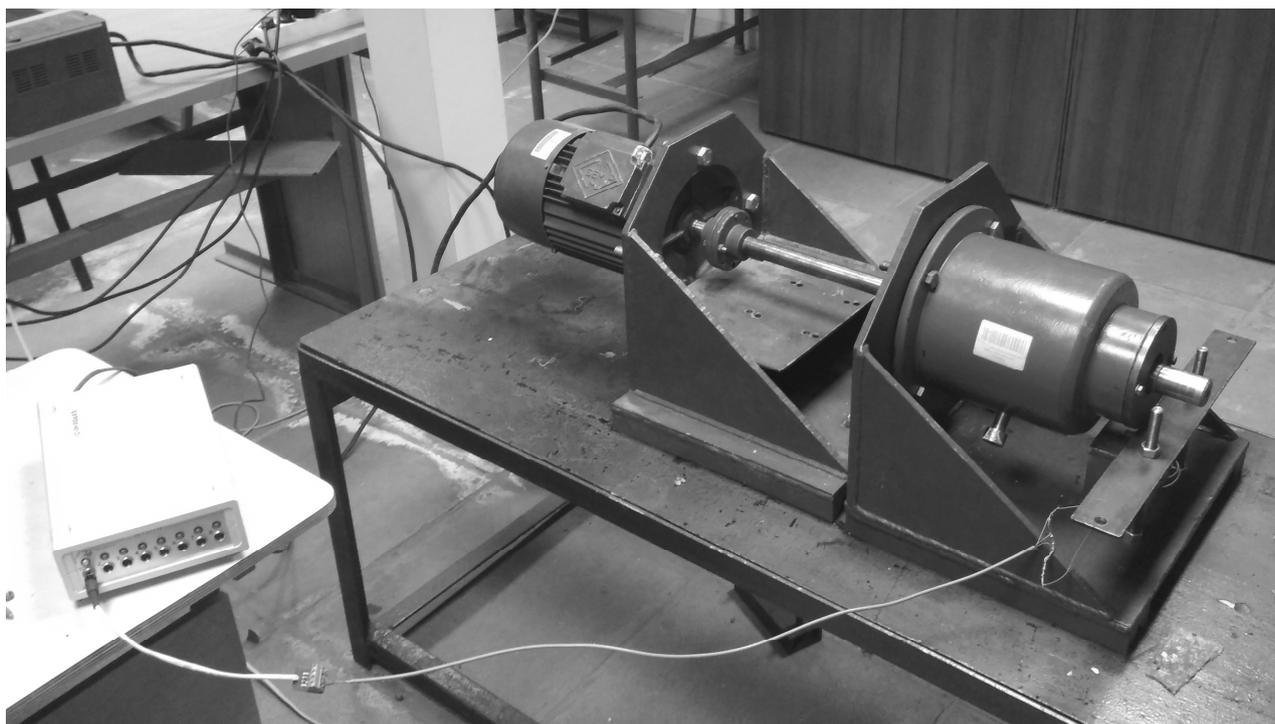


Рис. 4. Общий вид экспериментального комплекса

Fig. 4. General view of the experimental complex

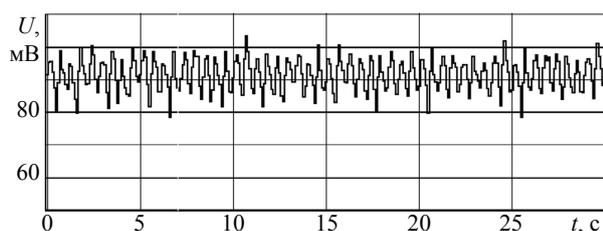


Рис. 5. Данные эксперимента при частоте двигателя 1,8 Гц

Fig. 5. Data of an experiment with a frequency of engine of 1.8 Hz

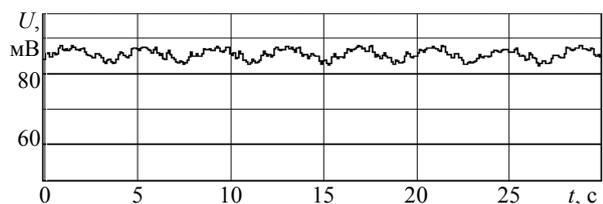


Рис. 6. Данные эксперимента при частоте двигателя 10 Гц

Fig. 6. Data of an experiment with a frequency of engine of 10 Hz

На динамические реакции с частотой двигателя (реакции от динамического дисбаланса водила) накладываются динамические реакции от движения роликов роликозубчатой передачи. Частота их появления в i раз меньше, чем частота появления динамических реакций от дисба-

ланса эксцентрикового водила. Соотношение амплитуд пропорционально i^2 . На других частотах вращения двигателя обнаружена такая же закономерность.

Выводы

Эксперимент подтверждает теоретическое возрастание амплитуд динамических реакций в планетарном механизме с роликовым механизмом передачи момента. Частота их появления в i раз меньше, чем частота появления динамических реакций от дисбаланса эксцентрикового водила. Соотношение амплитуд пропорционально i^2 , что говорит о незначительности добавочных реакций от роликов.

Возможны несколько путей снижения динамических реакций в планетарном механизме с роликовым механизмом передачи момента.

1. Динамическая балансировка водила путем размещения двух дополнительных масс на водиле.
2. Установка дополнительных дисков с обратным эксцентриситетом.
3. Выполнение конструкции планетарной передачи с тремя разнесенными сателлитами.

Выполнение этих рекомендаций дает возможность использовать планетарную роликозубчатую передачу, обладающую хорошими массогабаритными характеристиками и нагрузочной способностью, также и на высоких скоростях вращения.

Библиографические ссылки

1. Bostan I., Dulgheru V., Ciobanu R. [Elaboration and research of planetary precessional multiplier type $k-h-v$: IOP Conference Series]. *Proc. of the 7th International Conference on Advanced Concepts in Mechanical Engineering* (9-10 June 2016, Iasi, Romani) (ACME-2016), 2016, vol. 147, p. 012002. DOI: 10.1088/1757-899X/147/1/012002.
2. Wehrle E., Palomba I., Vidoni R. [In-Operation Structural Modification of Planetary Gear Sets Using Design Optimization Methods]. *Proc. of the 4th IFToMM Symposium on Mechanism Design for Robotics* (11-13 August, 2018, Udine, Italy). Springer, Cham, 2019, vol. 66, pp. 395-405. DOI: 10.1007/978-3-030-00365-4_47.
3. Plekhanov F., Goldfarb V. [Rational designs of planetary transmission, geometry of gearing and strength parameters]. *Mechanisms and Machine Science*, 2016, vol. 34, pp. 285-300. DOI: 10.1007/978-3-319-19740-1_13.
4. Plekhanov F.I., Kuznetsov V.S. [Deformability of elements of planetary transmission]. *Russian Engineering Research*, 2010, vol. 30, no. 6, pp. 557-560. DOI: 10.3103_s1068798x10060055.
5. Plekhanov F.I. [Influence of gear deformability in a planetary transmission on the load distribution in tooth engagement]. *Russian engineering research*, 2015, vol. 35, no. 7, pp. 485-488. DOI: 10.3103/S1068798X17120164.
6. Plekhanov F.I. [Deformability of units of a planetary gear and its effect on load distribution in gear meshes]. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2015, vol. 44, no. 3, pp. 227-231. DOI: 10.3103/S1068798X17120164.
7. Plekhanov F., Goldfarb V., Vychuzhanina E. [Load distribution in meshing of planetary gearwheels and its influence on the technical and economic performance of the mechanism]. *Mechanisms and Machine Science*, 2018, vol. 51, pp. 117-137. DOI: 10.1007/978-3-319-60399-5.
8. Plekhanov F.I., Ovsyannikov A.V. [Load capacity of planetary transmission with internal gear engagement]. *Russian Engineering Research*, 2011, vol. 31, no. 9, pp. 825-827. DOI: 10.3103/S1068798X11090218.
9. Plekhanov F., Pushkarev A., Pushkarev I. [Influence of layout features and parameters of planetary gear on its dynamics and strength characteristics]. *Mechanisms and Machine Science*, 2018, vol. 51, pp. 481-494. DOI: 10.1007/978-3-319-60399-5.
10. Zhang A., Wei J., Qin D., Qin D. [Analytical coupling characterization of multi-stage planetary gear free vibration considering flexible structure]. *Journal of Vibroengineering*, 2017, vol. 19, is. 6. DOI: 10.21595/jve.2017.17767.
11. Zhou W., Zuo Y., Zheng M. [Analysis and Optimization of the Vibration and Noise of a Double Planetary Gear Power Coupling Mechanism]. *Shock and Vibration*, 2018. DOI: 10.1155/2018/9048695.
12. Shao Y. [The relationship between the engaging force of planetary gear train and the position correlated modal properties]. *The Journal of Engineering*, 2019. DOI: 10.1049/joe.2018.8964.
13. Bao H, Jin G., Lu F., Zhu R., Zou X. [Dynamic analysis of planetary gear train system with double moduli and pressure angles]. *MATEC Web of Conferences 211, 17003. The 14th International Conference on Vibration Engineering and Technology of Machinery (VETOMAC XIV)* (Lisbon, Portugal, September 10-13, 2018), 2018, vol. 211. DOI: 10.1051/mateconf/201821117003.
14. Yu Y., Liu J., Ye B., Yu G., Jin X., Sun L., Tong J. [Design and Experimental Research on Seedling Pick-Up Mechanism of Planetary Gear Train with Combined Non-circular Gear Transmission]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2019, vol. 32, pp. 1-13. DOI: 10.1186/s10033-019-0357-3.
15. Плеханов Ф. И., Овсянников А. В. Силовой расчет механизма восприятия момента зубчато-роликовой планетарной передачи // Известия вузов. Машиностроение. 2011. № 3. С. 26–29.
16. Пушкарев И. А., Пушкарева Т. А. Исследование структуры и динамики зубчато-роликовой планетарной передачи // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. междунар. науч. конф. (Минск, Беларусь, 8–12 октября 2018 г.) : в 12 т. / под общ. ред. А. А. Большакова. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2018. Т. 8. С. 40–43.
17. Овсянников А. В., Перминов Л. П. Экспериментальное определение КПД планетарных передач типа $k-h-v$ с роликовыми механизмами снятия движения с спутника // Вестник ИжГТУ. 2013. № 2 (58). С. 29–32.
18. Овсянников А. В. Кинематика и показатели прочности планетарной передачи типа $k-h-v$ с роликовым механизмом снятия движения : дис. ... канд. техн. наук. Ижевск, 2012. 143 с.

References

1. Bostan I., Dulgheru V., Ciobanu R. [Elaboration and research of planetary precessional multiplier type $k-h-v$: IOP Conference Series]. *Proc. of the 7th International Conference on Advanced Concepts in Mechanical Engineering* (9-10 June 2016, Iasi, Romani) (ACME-2016), 2016, vol. 147, p. 012002. DOI: 10.1088/1757-899X/147/1/012002.
2. Wehrle E., Palomba I., Vidoni R. [In-Operation Structural Modification of Planetary Gear Sets Using Design Optimization Methods]. *Proc. of the 4th IFToMM Symposium on Mechanism Design for Robotics* (11-13 August, 2018, Udine, Italy). Springer, Cham, 2019, vol. 66, pp. 395-405. DOI: 10.1007/978-3-030-00365-4_47.
3. Plekhanov F., Goldfarb V. [Rational designs of planetary transmission, geometry of gearing and strength parameters]. *Mechanisms and Machine Science*, 2016, vol. 34, pp. 285-300. DOI: 10.1007/978-3-319-19740-1_13.
4. Plekhanov F.I., Kuznetsov V.S. [Deformability of elements of planetary transmission]. *Russian Engineering Research*, 2010, vol. 30, no. 6, pp. 557-560. DOI: 10.3103_s1068798x10060055.
5. Plekhanov F.I. [Influence of gear deformability in a planetary transmission on the load distribution in tooth

engagement]. *Russian engineering research*, 2015, vol. 35, no. 7, pp. 485-488. DOI: 10.3103/S1068798X17120164.

6. Plekhanov F.I. [Deformability of units of a planetary gear and its effect on load distribution in gear meshes]. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2015, vol. 44, no. 3, pp. 227-231. DOI: 10.3103/S1068798X17120164.

7. Plekhanov F., Goldfarb V., Vychuzhanina E. [Load distribution in meshing of planetary gearwheels and its influence on the technical and economic performance of the mechanism]. *Mechanisms and Machine Science*, 2018, vol. 51, pp. 117-137. DOI: 10.1007/978-3-319-60399-5.

8. Plekhanov F. I., Ovsyannikov A.V. [Load capacity of planetary transmission with internal gear engagement]. *Russian Engineering Research*, 2011, vol. 31, no. 9, pp. 825-827.

9. Plekhanov F., Pushkarev A., Pushkarev I. [Influence of layout features and parameters of planetary gear on its dynamics and strength characteristics]. *Mechanisms and Machine Science*, 2018, vol. 51, pp. 481-494. DOI: 10.1007/978-3-319-60399-5.

10. Zhang A., Wei J., Qin D., Qin D. [Analytical coupling characterization of multi-stage planetary gear free vibration considering flexible structure]. *Journal of Vibroengineering*, 2017, vol. 19, is. 6. DOI: 10.21595/jve.2017.17767.

11. Zhou W., Zuo Y., Zheng M. [Analysis and Optimization of the Vibration and Noise of a Double Planetary Gear Power Coupling Mechanism]. *Shock and Vibration*, 2018. DOI: 10.1155/2018/9048695.

12. Shao Y. [The relationship between the engaging force of planetary gear train and the position correlated modal properties]. *The Journal of Engineering*, 2019. DOI: 10.1049/joe.2018.8964.

13. Bao H, Jin G., Lu F., Zhu R., Zou X. [Dynamic analysis of planetary gear train system with double moduli and pressure angles]. *MATEC Web of Conferences 211, 17003. The 14th International Conference on Vibration Engineering and Technology of Machinery (VETOMAC XIV)* (Lisbon, Portugal, September 10-13, 2018), 2018, vol. 211. DOI: 10.1051/mateconf/201821117003.

14. Yu Y., Liu J., Ye B., Yu G., Jin X., Sun L., Tong J. [Design and Experimental Research on Seedling Pick-Up Mechanism of Planetary Gear Train with Combined Non-circular Gear Transmission]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2019, vol. 32, pp. 1-13. DOI: 10.1186/s10033-019-0357-3.

15. Plekhanov F.I., Ovsyannikov A.V. [Power calculation of the mechanism of perception of the moment of the gear-roller planetary gear]. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*, 2011, no. 3, pp. 26-29 (in Russ.).

16. Pushkarev I.A., Pushkareva T.A. [Study of the structure and dynamics of the gear-roller planetary gear]. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh* (Minsk, Belarus, 8-12 oktyabrya 2018 g.). [Proc. conf. "Mathematical Methods in Technics and Technologies" (Minsk, Belarus, October 8-12, 2018)]. St. Petersburg, Polytechnic. University Publ., 2018, pp. 40-43 (in Russ.).

17. Ovsyannikov A.V., Perminov L.P. [Experimental Determination of Efficiency of k-h-v Planetary Transmissions with Roller Mechanisms for Torque Absorption from the Satellite]. *Vestnik IzhGTU*, 2013, no. 2, pp. 29-32 (in Russ.).

18. Ovsyannikov A.V. *Kinematika i pokazateli prochnosti planetarnoy peredachi tipa k-h-v s rolikovym mehanismom snyatiya dvizheniya* [Kinematics and strength indices of planetary gear of k-h-v type with roller-type motion removal mechanism]: PhD thesis. Izhevsk, 2012, 143 p. (in Russ.).

Experimental Research of Dynamic Reactions in Planetary Gears with the Roller Mechanism for Torque Absorption

I.A. Pushkarev, Post-graduate, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

L.P. Perminov, Applicant, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

I.V. Kuznetsov, Alpha Ltd., Sarapul, Russia

A.E. Pushkarev, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

Results of an experimental research of k-h-v type planetary gears with cylindrical rollers of the mechanism for torque absorption from the satellite are given.

Dynamic reactions in this gear are defined by three factors: the presence of the planet carrier eccentricity, the movement of rollers in the gear and oscillatory processes. Eccentricity causes the emergence of a centrifugal moment of inertia concerning a spin axis of the planet carrier. Determination of the centrifugal moment of inertia in connection with the constant movement of rollers, is complicated. The movement of rollers should be shown as the increase in dynamic reactions through the certain period connected with the gear ratio from the planet carrier to satellites that is required to be confirmed experimentally. The experimental complex connected with the personal computer is described.

The experimental stand gives an opportunity to vary the angular speed of a shaft of the electric motor, to fix and process indications of strain gages, using the corresponding software.

Influence of rollers of the planetary gear on change of dynamic reactions is researched with different frequencies of the engine. Conclusions are drawn on the rational change of construction of the tooth-roller mechanism for the purpose of decrease in dynamic reactions in the planetary mechanism with the roller mechanism for torque absorption from the satellite.

Execution of recommendations gives the chance to use the planetary tooth-roller gear also at high rotational speeds.

Keywords: planetary gear, dynamics, reactions, roller, mechanism.

Получено 19.08.2019

Образец цитирования

Экспериментальное исследование динамических реакций в планетарных передачах с роликовым механизмом передачи момента / И. А. Пушкарёв, Л. П. Перминов, И. В. Кузнецов, А. Э. Пушкарёв // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2019. Т. 22, № 3. С. 26–32. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-3-26-32.

For Citation

Pushkarev I. A., Perminov L. P., Kuznetsov I. V., Pushkarev A. E. [Experimental research of dynamic reactions in planetary gears with the roller mechanism for torque absorption]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2019, vol. 22, no. 3, pp. 26-32 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2019-3-26-32.