

УДК 621.891

Оценка нагрузочной способности червячной передачи на основе анализа фрикционных колебаний быстроходного вала

С.А. Поляков^{1,2}, Е.М. Кулешова¹, С.Ю. Гончаров¹

¹Московский Государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, ул. 2-я Бауманская, д. 5, г. Москва 105005, Россия

²Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Малый Харитоньевский переулок, д. 4, г. Москва 101000, Россия

Поступила в редакцию 22.05.2025.

В статье показана взаимосвязь между снижением энергоэффективности и нагрузочной способности червячных передач с ростом амплитуды колебаний вращающего момента по мере увеличения нагрузки на сопряжение. Проведён анализ причин роста амплитуды колебаний вращающего момента при увеличении нагрузки на передачу. Показано, что нарушение режима автоколебаний, возникающих в червячной передаче, должно происходить по причине роста коэффициента трения, который зависит от условий смазывания, в частности, от толщины смазочной плёнки. В работе показано, что в случае смазывания передачи штатным минеральным маслом с наномодифицированной добавкой потеря устойчивости автоколебаний происходит при значительно больших нагрузках (290 Н·м), чем в случае смазывания штатным минеральным маслом без добавки (230 Н·м), что указывает на большую устойчивость этого варианта к возмущающим воздействиям, и может объясняться большей толщиной смазочной плёнки. В работе получены графики зависимости КПД червячной передачи от тормозного момента для различных вариантов смазочных материалов. Показано, что увеличение КПД в случае применения штатного минерального масла с наномодифицированной добавкой (нанодисперсной суспензии серпентина в растворе солей жирных кислот) по сравнению с штатным минеральным маслом связано с улучшением антифрикционности сопряжения и снижением амплитуды колебаний вращающего момента. В работе показано, что устойчивость червячной передачи к нагружающим воздействиям может быть экспериментально оценена путём замера амплитуды колебаний вращающего момента на быстроходном валу передачи. Для расширения диапазона допустимых нагрузок необходимо улучшение антифрикционных свойств смазочного материала путём использования наномодифицированной добавки, что приводит к снижению амплитуды автоколебаний червячного вала, уменьшению пути трения и к снижению потерь мощности.

Ключевые слова: червячная передача, коэффициент динамичности, виброустойчивость, КПД, энергоэффективность, наномодифицированный смазочный материал, автоколебания, мощность, коэффициент трения, толщина смазочной плёнки.

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-5-476-484

Адрес для переписки:

Е.М. Кулешова
Московский Государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана,
ул. 2-я Бауманская, д. 5, г. Москва 105005, Россия
e-mail: kuleshova.em@mail.ru

Address for correspondence:

E.M. Kuleshova
Moscow State Technical University named after N.E. Bauman,
ul. 2-ya Baumanskaia, d. 5, Moscow 105005, Russia
e-mail: kuleshova.em@mail.ru

Для цитирования:

С.А. Поляков, Е.М. Кулешова, С.Ю. Гончаров.
Оценка нагрузочной способности червячной передачи на основе
анализа фрикционных колебаний быстроходного вала.
Трение и износ.
2025. – Т. 46, № 5. – С. 476–484.
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-5-476-484

For citation:

S.A. Polyakov, E.M. Kuleshova, and S.Yu. Goncharov.
[Estimation of the Load Capacity of a Worm Gear Based on the
Analysis of Frictional Vibrations of a High-Speed Shaft].
Trenie i Iznos.
2025, vol. 46, no. 5, pp. 476–484 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-5-476-484

Estimation of the Load Capacity of a Worm Gear Based on the Analysis of Frictional Vibrations of a High-Speed Shaft

S.A. Polyakov^{1,2}, E.M. Kuleshova¹, and S.Yu. Goncharov¹

¹Moscow State Technical University named after N.E. Bauman,
ul. 2-ya Baumanskaia, d. 5, Moscow 105005, Russia

²Institute of Machines Science named after A.A. Blagonravov, Russian Academy of Sciences,
Malyi Haritonevskii pereulok, d. 4, Moscow 101990, Russia

Received 22.05.2025.

Abstract

The article demonstrates the relationship between a decrease in energy efficiency and the load-carrying capacity of worm gears with an increase in the amplitude of torque oscillations as the mating load increases. An analysis of the causes of the increase in the amplitude of torque oscillations with increasing gear load is conducted. It is shown that the disruption of the self-oscillation mode occurring in a worm gear should occur due to an increase in the friction coefficient, which depends on the lubrication conditions, in particular, on the thickness of the lubricant film. The paper demonstrates that in the case of lubrication of the gear with standard mineral oil with a nanomodified additive, the loss of stability of self-oscillations occurs at significantly higher loads (290 N·m) than in the case of lubrication with standard mineral oil without the additive (230 N·m), which indicates greater resistance of this option to disturbing effects, and can be explained by the greater thickness of the lubricant film. In this paper, graphs of the worm gear efficiency versus braking torque were obtained for various lubricant options. It was shown that the increase in efficiency when using standard mineral oil with a nanomodified additive (a nanodispersed suspension of serpentine in a solution of fatty acid salts) compared to standard mineral oil is associated with improved antifriction properties of the coupling and a decrease in the amplitude of torque oscillations. The paper demonstrates that the stability of the worm gear under loading effects can be experimentally assessed by measuring the amplitude of torque oscillations on the high-speed shaft of the gear. To expand the range of permissible loads, it is necessary to improve the antifriction properties of the lubricant by using a nanomodified additive, which leads to a decrease in the amplitude of self-oscillations of the worm shaft, a decrease in the friction path, and a reduction in power losses.

Keywords: worm gear, coefficient of dynamism, vibration resistance, efficiency, energy efficiency, nanomodified lubricant, self-oscillation, power, coefficient of friction, thickness of the lubricating film.

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-5-476-484

Адрес для переписки:

Е.М. Кулешова
Московский Государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана,
ул. 2-я Бауманская, д. 5, г. Москва 105005, Россия
e-mail: kuleshova.em@mail.ru

Address for correspondence:

E.M. Kuleshova
Moscow State Technical University named after N.E. Bauman,
ul. 2-ya Baumanskaia, d. 5, Moscow 105005, Russia
e-mail: kuleshova.em@mail.ru

Для цитирования:

С.А. Поляков, Е.М. Кулешова, С.Ю. Гончаров.
Оценка нагрузочной способности червячной передачи на основе
анализа фрикционных колебаний быстроходного вала.
Трение и износ.
2025. — Т. 46, № 5. — С. 476—484.
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-5-476-484

For citation:

S.A. Polyakov, E.M. Kuleshova, and S.Yu. Goncharov.
[Estimation of the Load Capacity of a Worm Gear Based on the
Analysis of Frictional Vibrations of a High-Speed Shaft].
Trenie i Iznos.
2025, vol. 46, no. 5, pp. 476—484 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-5-476-484

Список использованных источников

и надежности машин. — 2016, № 5, 81—87

1. **Киселев Б.Р., Замятина Н.И., Годлевский В.А.** Оценка задиростойкости червячной пары при использовании трибоактивных присадок // Трение и смазка в машинах и механизмах. — 2013, № 10, 15—19
2. **Бирюков В.П., Горюнов Н.А., Принц А.Н.** Влияние присадки к базовым маслам для улучшения триботехнических характеристик в парах трения // Journal of Advanced Research in Technical Science. — 2022, № 30, 38—41
3. **Albagachiev A.Y. and Tokhmetova A.B.** Tribotechnical Properties of Nanomodifier 2 // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. — 2020, no. 10, 870—873
4. **Moshkovich A., Lapsker I., Feldman Y., and Rapoport L.** Severe Plastic Deformation of Four FCC Metals During Friction under Lubricated Conditions // Wear. — 2017 (386—387), 49—57
5. **Moshkovich A., Perfilyev V., and Rapoport L.** Effect of Plastic Deformation and Damage Development During Friction of FCC Metals in the Conditions of Boundary Lubrication // Lubricants. — 2019 (7), no. 5, 45
6. **Mai Y.J., Chen F.X., Zhou M.P., Xiao Q.N., and Jie X.H.** Anchored Graphene Nanosheet Films Towards High Performance Solid Lubricants // Materials & Design. — 2018 (160), 861—869
7. **Fontanari V., Benedetti M., Girardi C., and Giordanino L.** Investigation of the Lubricated Wear Behavior of Ductile Cast Iron and Quenched and Tempered Alloy Steel for Possible Use in Worm Gearing // Wear. — 2016 (350—351), 68—73
8. **Zakharov M.N. et al.** Improving Worm-Gear Performance by Optimal Lubricant Selection in Accelerated Tests // Russian Engineering Research. — 2015 (35), no. 4, 253—255. DOI: 10.3103/S1068798X150402069
9. **Берестнев О.В., Гоман А.М., Ишин Н.Н.** Аналитические методы механики в динамике приводов. — Минск: Наука и техника. — 1992
10. **Поляков С.А., Гончаров С.Ю., Лычагин В.В., Климов А.Ю., Куц М.С.** Анализ контактного взаимодействия в червячных передачах в связи с разработкой модели их нелинейных колебаний // Сборка в машиностроении, приборостроении. — 2017, № 11, 510—518
11. **Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э.** Теория колебаний. 2-е изд., перераб. и испр. — М.: Наука. — 1981
12. **Поляков С.А., Куksenova Л.И., Кулешова Е.М.** Особенности формирования несущей способности сопряжений скольжения при использовании наномодифицированных смазочных материалов // Трение и износ. — 2019 (40), № 6, 712—719
13. **Поляков С.А., Гончаров С.Ю., Куksenova Л.И.** Разработка метода оценки работоспособности червячных передач на основе анализа их триботехнических показателей // Проблемы машиностроения

References

1. **Kiselev B.R., Zamyatina N.I., Godlevskij V.A.** Ocenka zadirostojkosti chervyachnoj pary` pri ispol'zovanii triboaktivny`x prisadok // Trenie i smazka v mashinax i mexanizmax. — 2013, № 10, 15—19 (in Russian)
2. **Biryukov V.P., Goryunov N.A., Princz A.N.** Vliyanie prisadki k bazovy`m maslam dlya uluchsheniya tribotexnicheskixarakteristik v parax treniya // Journal of Advanced Research in Technical Science. — 2022, № 30, 38—41 (in Russian)
3. **Albagachiev A.Y. and Tokhmetova A.B.** Tribotechnical Properties of Nanomodifier 2 // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. — 2020, no. 10, 870—873
4. **Moshkovich A., Lapsker I., Feldman Y., and Rapoport L.** Severe Plastic Deformation of Four FCC Metals During Friction under Lubricated Conditions // Wear. — 2017 (386—387), 49—57
5. **Moshkovich A., Perfilyev V., and Rapoport L.** Effect of Plastic Deformation and Damage Development During Friction of FCC Metals in the Conditions of Boundary Lubrication // Lubricants. — 2019 (7), no. 5, 45
6. **Mai Y.J., Chen F.X., Zhou M.P., Xiao Q.N., and Jie X.H.** Anchored Graphene Nanosheet Films Towards High Performance Solid Lubricants // Materials & Design. — 2018 (160), 861—869
7. **Fontanari V., Benedetti M., Girardi C., and Giordanino L.** Investigation of the Lubricated Wear Behavior of Ductile Cast Iron and Quenched and Tempered Alloy Steel for Possible Use in Worm Gearing // Wear. — 2016 (350—351), 68—73
8. **Zakharov M.N. et al.** Improving Worm-Gear Performance by Optimal Lubricant Selection in Accelerated Tests // Russian Engineering Research. — 2015 (35), no. 4, 253—255. DOI: 10.3103/S1068798X150402069
9. **Berestnev O.V., Goman A.M., Ishin N.N.** Analiticheskie metody mekhaniki v dinamike privodov. — Minsk: Nauka i tekhnika. — 1992 (in Russian)
10. **Polyakov S.A., Goncharov S.Yu., Ly`chagin V.V., Klimov A.Yu., Kucz M.S.** Analiz kontaktnogo vzaimodejstviya v chervyachny`x peredachax v svyazi s razrabotkoj modeli ix nelinejny`x kolebanij // Sborka v mashinostroenii, priborostroenii. — 2017, № 11, 510—518 (in Russian)
11. **Andronov A.A., Vitt A.A., Hajkin S.E`.** Teoriya kolebanij. 2-e izd., pererab. i ispr. — M.: Nauka. — 1981 (in Russian)
12. **Polyakov S.A., Kuksenova L.I., and Kuleshova E.M.** The Kinetics of Load-Bearing Capacity Formation of Sliding Pairings in the Use of Nanomodified Lubricants // Journal of Friction and Wear. — 2019 (40), no. 6, 541—545
13. **Polyakov S.A., Goncharov S.Y., and Kuksenova L.I.** Development of Method for Evaluating

Performance of Worm Gears via Analysis of Their
Tribological Characteristics // Journal of

Machinery Manufacture and Reliability. — 2016
(45), no. 5, 458—463

Для приобретения полного текста статьи, обращайтесь в редакцию журнала.
Адрес редакции: 246050, ул. Кирова 32а, г. Гомель, Беларусь. Телефон/факс: +375 (232) 34 06 36 / 34 17 11
Full text of articles can be purchased from the editorial office.
Address: 32a Kirov Street, Gomel, Belarus, 246050. Phone: +375 (232) 34 06 36. Fax: +375 (232) 34 17 11
E-mail: FWJ@tut.by