

УДК 621.822; 621.824; 62-251

## Моделирование обката ротором статора с трением скольжения и качения между ними

А.Н. Никифоров

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

Поступила в редакцию 24.12.2024.

После доработки 14.02.2025.

Принята к публикации 18.02.2025.

Статья посвящена расчёту действующих сил и амплитудно-частотных характеристик системы «ротор–статор», находящейся в состоянии фрикционного контакта. В отличие от известных подходов сила нормального давления между ротором и статором определена не только упругостью и демпфированием их материалов в месте контакта или/и опор статора, но и изгибной комплексной жёсткостью всего ротора, условно получившего дополнительный подшипник с зазором. Такая квазистатическая реакция ротора на контакт со статором, изначально с кулоновским трением скольжения между ними, расширена до динамического контакта с трением качения ротора по статору, зависимым от силы нормального давления между ними. В предложенной математической модели и в рассмотренном практическом примере уравнения обката составлены и решены в матричной форме относительно скорости прецессии и перемещений ротора, исходя из системных (взаимосвязанных со статором) упруго-инерционных характеристик, а также из коэффициентов трения скольжения и качения, внутренних и внешних потерь. Расчётами установлены конечные диапазоны возможных угловых скоростей для безотрывного обкатывания ротором статора и показана возможность его устранения, корректируя всего два параметра системы — коэффициент демпфирования ротора и модуль упругости контактной поверхности статора.

**Ключевые слова:** ротор, вал, статор, обкат, проскальзывание, скольжение, качение, обратная прецессия, безотрывное движение.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2025-46-1-86-95

---

**Адрес для переписки:**

А.Н. Никифоров  
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,  
Малый Харитоньевский пер., д. 4, г. Москва 101000, Россия  
e-mail: n.andre@mail.ru

**Для цитирования:**

А.Н. Никифоров.  
Моделирование обката ротором статора с трением скольжения и качения между ними.  
Трение и износ.  
2025. — Т. 46, № 1. — С. 86–95.  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2025-46-1-86-95

---

**Address for correspondence:**

A.N. Nikiforov  
Mechanical Engineering Research Institute of the RAS,  
Maly Kharitonjevsky Lane 4, Moscow 101000, Russia  
e-mail: n.andre@mail.ru

**For citation:**

A. Nikiforov.  
[Simulation of Dry Friction Whirl and Whip with Rolling Effect between Rotor and Stator].  
Trenie i Iznos.  
2025, vol. 46, no. 1, pp. 86–95 (in Russian).  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2025-46-1-86-95

# Simulation of Dry Friction Whirl and Whip with Rolling Effect between Rotor and Stator

A.N. Nikiforov

Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences,  
Maly Kharitonjevsky Lane 4, Moscow 101000, Russia

Received 24.12.2024.

Revised 14.02.2025.

Accepted 18.02.2025.

## Abstract

The article is devoted to the calculation of the acting forces and amplitude-frequency characteristics for the rotor-stator system in a state of frictional contact. Unlike the known approaches, the normal pressure force between the rotor and stator is determined not only by the elasticity and damping of their materials at the point of contact and/or stator supports, but also by the bending complex stiffness of the entire rotor, which has conditionally received an additional bearing with a clearance. Such a quasi-static reaction of the rotor to contact with the stator, initially with Coulomb friction between them, is expanded to a dynamic contact with rolling friction of the rotor on the stator, dependent on the normal pressure force between them. In the proposed mathematical model and in the considered practical example, the motion equations are composed and solved in matrix form relative to the precession velocity and rotor displacements, based on the system (inter-related with the stator) elastic-inertial characteristics, as well as the coefficients of slipping and rolling friction, internal and external losses. The calculations established the final ranges of possible angular velocities for the continuous rolling of the rotor around the stator and showed the possibility of eliminating it by correcting only two system parameters, they are the rotor damping coefficient and the elastic modulus of the stator contact surface.

**Key words:** rotor, shaft, stator, whirling, whipping, reverse, backward precession.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2025-46-1-86-95

---

### Адрес для переписки:

А.Н. Никифоров  
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,  
Малый Харитоньевский пер., д. 4, з. Москва 101000, Россия  
e-mail: n.andre@mail.ru

### Для цитирования:

А.Н. Никифоров.  
Моделирование обката ротором статора с трением скольжения и качения между ними.  
Трение и износ.  
2025. — Т. 46, № 1. — С. 86–95.  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2025-46-1-86-95

---

### Address for correspondence:

A.N. Nikiforov  
Mechanical Engineering Research Institute of the RAS,  
Maly Kharitonjevsky Lane 4, Moscow 101000, Russia  
e-mail: n.andre@mail.ru

### For citation:

A. Nikiforov.  
[Simulation of Dry Friction Whirl and Whip with Rolling Effect between Rotor and Stator].  
*Trenie i Iznos*.  
2025, vol. 46, no. 1, pp. 86–95 (in Russian).  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2025-46-1-86-95

## Список использованных источников

1. **Денисов Г.Г. и др.** Об обкате ротора по жесткому подшипнику // Известия АН СССР. Механика твердого тела. — 1973, № 6, 4—13.
2. **Банах Л.Я.** Некоторые явления, возникающие при движении вала в подшипнике с зазором // Машиноведение. — 1965, № 1, 70—77
3. **Bartha A.R.** Dry Friction Backward Whirl of Rotors: Dissertation ETH no. 13817. — Zurich. — 2000
4. **Childs D.W. and Bhattacharya A.** Prediction of Dry-Friction Whirl and Whip Between a Rotor and a Stator // Journal of Vibration and Acoustics. — 2007 (129), no. 3, 355—362. DOI: 10.1115/1.2731412
5. **Grāpis O., et. al.** Overcritical High-Speed Rotor Systems, Full Annular Rub and Accident // Journal of Sound and Vibration — 2006 (290), 910—927. DOI: 10.1016/j.jsv.2005.04.031
6. **Jiang J. and Ulbrich H.** The Physical Reason and the Analytical Condition for the Onset of Dry Whip in Rotor-to-Stator Contact Systems // Journal of Vibration and Acoustics. — 2005 (127), no. 6, 594—603. <https://doi.org/10.1115/1.1888592>
7. **Wilkes J.C., et. al.** The Numerical and Experimental Characteristics of Multimode Dry-Friction Whip and Whirl // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. — 2010 (132), no. 5. Article: 052503-1-9, <https://doi.org/10.1115/1.3204658>
8. **Нашиф А., Джоунс Д., Хендерсон Дж.** Демпфирование колебаний. — М.: Мир. — 1988
9. **Allan R.K.** Rolling Bearings. — Published by Sir Isaac Pitman & Sons, Ltd. — 1946
10. **Бочкарёв Д.И. и др.** Влияния жесткости подрельсового основания на сопротивление движению подвижного состава // Трение и износ. — 2021 (42), № 5, 586—595 DOI: 10.32864/0202-4977-2021-42-5-586-595
11. **Hibbeler R.C.** Engineering Mechanics: Statics & Dynamics (Eleventh ed.). — Singapore: Pearson Prentice Hall. — 2007, 441—442
12. **Тихомиров В.П. и др.** Статическая грузоподъемность сферического подшипника скольжения // Вестник Брянского государственного технического университета. — 2017, № 3(56), 39—48
13. **Галахов М.А., Бурмистров А.Н.** Расчёт подшипниковых узлов. — М.: Машиностроение. — 1988
14. **Никифоров А.Н.** Прикладная полумпирическая теория безотрывного движения ротора по статору. — СПб: СУПЕР. — 2021
15. **Nelson H.D.** A Finite Rotating Shaft Element Using Timoshenko Beam Theory // ASME Journal of Mechanical Design. — 1980 (102), no. 4, 793—803

## References

1. **Denisov G.G. i dr.** Ob obkate rotora po zhestkomu podshpniku // Izvestia AN SSSR. Mekhanika tverdogo tela. — 1973, № 6, 4—13 (in Russian)
2. **Banakh L.Ya.** Nekotorye yavleniya, voznikayushchie pri dvizhenii vala v podshpнике s zazorom // Mashinovedenie. — 1965, № 1, 70—77 (in Russian)
3. **Bartha A.R.** Dry Friction Backward Whirl of Rotors: Dissertation ETH no. 13817. — Zurich. — 2000
4. **Childs D.W. and Bhattacharya A.** Prediction of Dry-Friction Whirl and Whip Between a Rotor and a Stator // Journal of Vibration and Acoustics. — 2007 (129), no. 3, 355—362. DOI: 10.1115/1.2731412
5. **Grāpis O., et. al.** Overcritical High-Speed Rotor Systems, Full Annular Rub and Accident // Journal of Sound and Vibration — 2006 (290), 910—927. DOI: 10.1016/j.jsv.2005.04.031
6. **Jiang J. and Ulbrich H.** The Physical Reason and the Analytical Condition for the Onset of Dry Whip in Rotor-to-Stator Contact Systems // Journal of Vibration and Acoustics. — 2005 (127), no. 6, 594—603. <https://doi.org/10.1115/1.1888592>
7. **Wilkes J.C., et. al.** The Numerical and Experimental Characteristics of Multimode Dry-Friction Whip and Whirl // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. — 2010 (132), no. 5. Article: 052503-1-9, <https://doi.org/10.1115/1.3204658>
8. **Nashif A., Jones D., and Henderson J.** Vibration Damping. — New York: Wiley. — 1985
9. **Allan R.K.** Rolling Bearings. — Published by Sir Isaac Pitman & Sons, Ltd. — 1946
10. **Bochkaryov D.I., Pranevich I.I., Lapushkin A.S. et al.** The Influence of Track Foundation Stiffness on the Resistance to Movement of Rolling Stock // Journal of Friction and Wear. — 2021 (42), 383—390. DOI: 10.3103/S1068366621050020
11. **Hibbeler R.C.** Engineering Mechanics: Statics & Dynamics (Eleventh ed.). — Singapore: Pearson Prentice Hall. — 2007, 441—442
12. **Tihomirov V.P. i dr.** Statischeckaya gruzopod'yomnost' sfericheskogo podshpника skol'zheniya // Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. — 2017, № 3(56), 39—48 (in Russian)
13. **Galakhov M.A., Burmistrov A.N.** Raschet podshpnikovyx uzlov. — М.: Mashinostroenie. — 1988 (in Russian)
14. **Nikiforov A.N.** Prikladnaya poluempiricheskaya teoriya bezotryvnogo dvizheniya rotora po statoru. — SPb: SUPER. — 2021 (in Russian)
15. **Nelson H.D.** A Finite Rotating Shaft Element Using Timoshenko Beam Theory // ASME Journal of Mechanical Design. — 1980 (102), no. 4, 793—803

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](mailto:FWJ@tut.by)