

УДК 621.822, 621.824, 62-251

Моделирование трения ротора о статор при непостоянной жесткости контактных поверхностей и малом зазоре между ними

А.Н. Никифоров

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

Поступила в редакцию 13.03.2023.

После доработки 29.05.2023.

Принята к публикации 20.06.2023.

Разработаны методики аналитического и численного моделирования контактно-рабочей системы турбо- и электромашин. Они позволяют определять динамические характеристики и нагрузки в системе типа «ротор—статор» в случае выборки зазора между ними и последующих их движений с ударами или без отрыва друг от друга. В системе ротор и статор деформируемы, жёсткость трущихся поверхностей переменна и рабочий зазор между ними предельно мал (в 50—500 раз меньше радиуса ротора в контактном месте). Показано, что эффект абсолютной упругости статора порождает значительное изменение собственных колебаний связанной системы «ротор—статор», то есть её собственных частот и форм. Отмечено, что упругая деформация трущихся поверхностей приводит к нелинейному увеличению их контактной жёсткости, складывающейся из квазистатической и динамической составляющих. Последствиями предельно малого зазора становятся соразмерная с ним упругая деформация контактных поверхностей (до половины величины зазора в месте контакта) при обкатке с проскальзыванием ротора по статору, а также исчезновение чистого качения, которое сопровождается фактическим отсутствием частот вращения даже при низкочастотных формах обкатывания. Полученные диаграммы изменений контактных жёсткостей и прецессионных частот и XY-траектории могут служить источниками исходной информации для идентификации работы реальной роторной машины на пороге опасной обкатки и при дальнейших исследованиях контактных колебаний роторов.

Ключевые слова: ротор, вал, статор, обкатка, проскальзывание, скольжение, прецессия, безотрывное движение.

DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-3-270-283

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

Address for correspondence:

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

Для цитирования:

А.Н. Никифоров
Моделирование трения ротора о статор при непостоянной жесткости контактных поверхностей и малом зазоре между ними. Трение и износ. 2023. — Т. 44, № 3. — С. 270—283.
DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-3-270-283

For citation:

A.N. Nikiforov
[Friction Simulation at Rotor on Stator with Non-Constant Stiffness of the Contact Surfaces and Small Clearance Between Them].
Trenie i Iznos. 2023, vol. 44, no. 3, pp. 270–283 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-3-270-283

Friction Simulation at Rotor on Stator with Non-Constant Stiffness of the Contact Surfaces and Small Clearance Between Them

A.N. Nikiforov

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

Received 13.03.2023.

Revised 29.05.2023.

Accepted 20.06.2023.

Abstract

Analytical and numerical modeling approaches for the contact-working system of turbo- and electric machines have been developed. The simulation allows to determine some dynamic characteristics and loads in the rotor-stator system when there is a clearance between them loss and their subsequent motions with impacts or without separation from each other. In the system, rotor and stator are deformable, the stiffness of rubbing surfaces is variable, and the working clearance between them is extremely small (50—500 times less than the rotor radius at the contact point). It is shown that an effect of the absolute elasticity for stator generates a significant change in natural oscillations of the coupled rotor—stator system, that is, for its eigenfrequencies and eigenmodes. It is noted that the elastic deformation of rubbing surfaces leads to a non-linear increase in their contact stiffness, which consists of quasi-static and dynamic components. The consequences of an extremely small clearance are an elastic deformation of the contact surfaces commensurate with it (up to half the clearance size at the point of contact) during rolling with slipping of rotor over stator, as well as the disappearance of pure rolling, which is accompanied by the actual absence of rotary speeds even at low frequencies of contact whirling. The resulting diagrams of changes in contact stiffness and whirling frequencies and XY -trajectories can serve as sources of initial information for identifying the operation of real rotary machine on the threshold of a dangerous rolling with slipping and whipping and for further studies of contact oscillations of rotors.

Keywords: rotor, shaft, stator, rolling, slipping, whirling, whipping.

DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-3-270-283

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

Address for correspondence:

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

Для цитирования:

А.Н. Никифоров
Моделирование трения ротора о статор при непостоянной жесткости контактных поверхностей и малом зазоре между ними. Трение и износ. 2023. — Т. 44, № 3. — С. 270—283.
DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-3-270-283

For citation:

A.N. Nikiforov
[Friction Simulation at Rotor on Stator with Non-Constant Stiffness of the Contact Surfaces and Small Clearance Between Them].
Trenie i Iznos. 2023, vol. 44, no. 3, pp. 270—283 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-3-270-283

Список использованных источников

1. **Банах Л.Я., Тывес Л.И.** Экспериментальный анализ кинематики движений плавающих элементов в роторных механизмах // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2020, № 3, 11—16. DOI: 10.31857/S0235711920030049
2. **Куракин А.Д.** Влияние трения на вибрационные характеристики роторной системы при задевании ротора о статор // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. — 2020, № 61, 22—30. DOI: 10.15593/2224-9982/2020.61.03
3. **Никифоров А.Н.** Прикладная полуэмпирическая теория безотрывного движения ротора по статору / Монография. — Санкт-Петербург: СУПЕР Издательство. — 2021; Андрей Никифоров, Прикладная полуэмпирическая теория безотрывного движения ротора по статору — скачать pdf на ЛитРес (litres.ru)
4. **Шатохин В.Ф.** Колебания ротора турбогенератора с задеваниями в пролете и опорах // Теплоэнергетика. — 2020, № 5, 25—30. DOI: 10.1134/S0040363620050094
5. **Alber O.** Experimental Analysis of Rotor-Stator Contact with Many Degrees of Freedom // Proceedings of the 9th IFToMM International Conference on Rotor Dynamics. — 2015 (21), 1935—1944. DOI: 10.1007/978-3-319-06590-8_160
6. **Al-Shudeifat M.A., Friswell M., Shiryayev O., and Nataraj C.** On Post-Resonance Backward Whirl in an Overhung Rotor with Snubbing Contact // Nonlinear Dynamics. — 2020 (101), 741—754. <https://doi.org/10.1007/s11071-020-05784-3>
7. **Chipato E., Shaw A.D., and Friswell M.I.** Frictional Effects on the Nonlinear Dynamics of an Overhung Rotor // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. — 2019 (78), Article no. 104875, <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2019.104875>
8. **Krishna I.R.P. and Padmanabhan C.** Experimental and Numerical Investigations on Rotor-Stator Rub // Journal of Mechanical Engineering Science. — 2018 (232), 3200—3212. DOI: 10.1177/0954406217735348
9. **Mercier A., Jézéquel L., Besset S., Hamdi A., and Diebold J.-F.** Studies on Detachment Non-Linearity at the Rotor-Stator Interface // Journal of Sound and Vibration. — 2020 (468), Article no. 115084. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.115084>
10. **Peletan L., Baguet S., Torkhani M., and Jacquet-Richardet G.** Quasi-Periodic Harmonic Balance Method for Rubbing Self-Induced Vibrations in Rotor-Stator Dynamics // Nonlinear Dynamics. — 2014 (78), 2501—2515. DOI: 10.1007/s11071-014-1606-8
11. **Varney P. and Green I.** Rough Surface Contact of Curved Conformal Surfaces: An Application to Rotor-Stator Rub. Transactions of the ASME // Journal

of Tribology. — 2016 (138), no. 4, 041401-1—041401-7, <https://doi.org/10.1115/1.4032786>

12. **Yu P. and Chen G.** Nonlinear Modal Analysis and Its Application on Prediction of Resonance Speed for a Rotor-Stator Rubbing System // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. — 2021 (43), Article no. 209. <https://doi.org/10.1007/s40430-021-02918-5>

References

1. **Banakh L.Y. and Tyves L.I.** Experimental Analysis of the Kinematics of Motion of Floating Elements in Rotor Mechanisms // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. — 2020 (49), no. 3, 184—188. DOI: 10.3103/S1052618820030048
2. **Kurakin A.D.** Vliyanie treniya na vibratsionnye kharakteristiki rotornoy sistemy pri zadevanii rotora za stator // Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aero-kosmicheskaya tekhnika. — 2020, № 61, 22—30. DOI: 10.15593/2224-9982/2020.61.03 (in Russian)
3. **Nikiforov A.N.** Prikladnaya poluempiricheskaya teoriya bezotryvnogo dvizheniya rotora po statoru / Monografiya. — Sankt-Peterburg: SUPER Izdatel'stvo. — 2021. https://ridero.ru/books/prikladnaya_poluempiricheskaya_teoriya_bezotryvnogo_dvizheniya_rotora_po_statoru/ (in Russian)
4. **Shatokhin V.F.** Turbine Generator Rotor Vibrations with Rubbing in the Span and Supports // Thermal Engineering. — 2020 (67), no. 5, 266—270. DOI: 10.1134/S0040601520050092
5. **Alber O.** Experimental Analysis of Rotor-Stator Contact with Many Degrees of Freedom // Proceedings of the 9th IFToMM International Conference on Rotor Dynamics. — 2015 (21), 1935—1944. DOI: 10.1007/978-3-319-06590-8_160
6. **Al-Shudeifat M.A., Friswell M., Shiryayev O., and Nataraj C.** On Post-Resonance Backward Whirl in an Overhung Rotor with Snubbing Contact // Nonlinear Dynamics. — 2020 (101), 741—754. <https://doi.org/10.1007/s11071-020-05784-3>
7. **Chipato E., Shaw A.D., and Friswell M.I.** Frictional Effects on the Nonlinear Dynamics of an Overhung Rotor // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. — 2019 (78), Article no. 104875. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2019.104875>
8. **Krishna I.R.P. and Padmanabhan C.** Experimental and Numerical Investigations on Rotor-Stator Rub // Journal of Mechanical Engineering Science. — 2018 (232), 3200—3212. DOI: 10.1177/0954406217735348
9. **Mercier A., Jézéquel L., Besset S., Hamdi A., and Diebold J.-F.** Studies on Detachment Non-Linearity at the Rotor-Stator Interface // Journal of Sound and Vibration. — 2020 (468), Article no. 115084. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.115084>
10. **Peletan L., Baguet S., Torkhani M., and Jacquet-Richardet G.** Quasi-Periodic Harmonic Balance

- Method for Rubbing Self-Induced Vibrations in Rotor-Stator Dynamics // *Nonlinear Dynamics*. — 2014 (**78**), 2501—2515. DOI: 10.1007/s11071-014-1606-8
11. **Varney P. and Green I.** Rough Surface Contact of Curved Conformal Surfaces: An Application to Rotor-Stator Rub // *Transactions of the ASME. Journal of Tribology*. — 2016 (**138**), no. 4, 041401-1—041401-7, <https://doi.org/10.1115/1.4032786>
12. **Yu P. and Chen G.** Nonlinear Modal Analysis and Its Application on Prediction of Resonance Speed for a Rotor-Stator Rubbing System // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. — 2021 (**43**), Article no. 209. <https://doi.org/10.1007/s40430-021-02918-5>

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