

4. Olegin, I.P. (1999), "The solution of the spatial problem of elasticity theory for a transversally isotropic body with a periodic system of ellipsoidal cavities", *Sibirskij zhurnal industrial'noj matematiki*, vol. II, no. 1, pp. 117-122.
5. Garishin, O.K. and Komar, L.A. (2003), "Prediction strength elastomeric of granular composites depending on particle size of the filler", *Mehanika kompozicionnyh materialov i konstrukcij*, vol. 9, no. 3, pp. 278-286.
6. Tsuchida, E., Nakahara, I. and Kodama, M. (1980), "On the asyymmetric problem of the theory for an infinite elastic solid containing two spherical inclusions", *Bull. JSME*, vol. 23, no. 181, pp. 1072-1080.
7. Tsuchida, E., Saito, Y., Nakahara, I. and Kodama, M. (1982), "Stress concentration around a prolate spheroidal cavity in a semi-infinite elastic body under all-round tension", *Bull. JSME*, vol. 25, no. 202, pp. 493-500.
8. Kushh, V.I. (1995), "Stress state and the efficient elastic moduli of the medium normalized to periodically arranged spheroidal inclusions", *Prikladnaya mehanika*, vol. 31, no. 3, pp. 32-39.
9. Ovid'ko, I.A. and Sheynerman, A.G. (2010), "Elastic fields of nanoscopic inclusions in nanocomposites", *Fizika i mehanika materialov*, vol. 10, no. 1/2, pp. 1-29.
10. Traytak, S.D. (2005), "Methods of solving boundary problems in domains with disconnected abroad", *Mehanika kompozicionnyh materialov i konstrukcij*, vol. 11, no. 1, pp. 87-112.
11. Nikolaev, A.G. and Tanchik, E.A. (2014), "Stress state of the porous material in the region between the four spheroidal pores", *Visnik NTU «HPI», Seriya: Matematichne modelyuvannya v tehnicji ta tehnologiyah*, no. 6 (1049), pp. 150-160.
12. Nikolaev, A.G. and Tanchik, E.A. (2014), "Elastic space with four spheroidal inclusions under the action of the external load", *Aviacionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya*, no. 4(111), pp. 49-60.
13. Nikolaev, A.G. (1993), *Teoremy slozheniya resheniy uravneniya Lamé* [Addition theorems of solutions of equation Lamé], Khar'k. aviac. in-t, Kharkiv, 109 p., Dep. v GNTB Ukrainy 21.06.93, № 1178 – Uk 93.
14. Nikolaev, A.G. and Procenko, V.S. (2011), *Obobshhennyj metod Fur'e v prostranstvennyh zadachah teorii uprugosti* [A generalized Fourier method in spatial problems of elasticity theory], Nac. aerokosm. un-t im. N. E. Zhukovskogo «Khar'k. aviac. in-t», Kharkiv.
15. Nikolaev, A.G. and Tanchik, E.A. (2014), "The development apparatus of the generalized Fourier method to multiply connected some field and its use for modeling porous material", *Aviacionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya*, no. 6(113), pp. 48-56.
16. Nikolaev, A.G. and Tanchik, E.A. (2014), *Uprugaya mehanika mnogokomponentnyh tel* [Elastic mechanics of multicomponentof bodies], Nac. aerokosm. un-t im. N.E. Zhukovskogo "Khar'k. aviac. in-t", Kharkiv.
17. Nikolaev, A.G. (1998), "Justification of generalized Fourier method in the basics boundary value problems of elasticity theory for some of the spatial canonical domains", *Dopovidi NAN Ukraini*, vol. 2, pp. 78-83.

УДК 621.01: 62-883

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД В ТЕХНИЧЕСКОМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ ПРЯМЫХ ПРИВОДОВ БЕСКОНТАКТНОГО ТИПА

Носко П. Л., д. т. н., Брешев В. Е., к. т. н., Брешев А. В., инженер,
Панкратова С. С., аспирант

*Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля,
просп. Советский, 59А, г. Северодонецк, 93406, Украина*

abreshev@gmail.com

Систематизированы основные направления технического совершенствования приводов, в которых роторы приводятся во вращение и удерживаются в требуемом положении без непосредственного механического контакта между деталями, совершающими относительное движение. Показана целесообразность рассмотрения бесконтактных приводов как единой механической системы, обоснована эффективность регулирования их опорной системы для расширения диапазонов скоростных режимов, повышения жесткости и несущей способности, снижения эксплуатационных затрат.

Ключевые слова: аэростатическая опора, газовая смазка, прямой привод, грузоподъемность, жесткость.

СИСТЕМНИЙ ПІДХІД У ТЕХНІЧНОМУ ВДОСКОНАЛЕННІ ПРЯМИХ ПРИВОДІВ БЕЗКОНТАКТНОГО ТИПУ

Носко П. Л., д. т. н., Брешев В. Є., к. т. н., Брешев О. В., інженер,
Панкратова С. С., аспірант

*Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля,
просп. Радянський, 59А, м. Сєвєродонецьк, 93406, Україна*

abreshev@gmail.com

Систематизовано основні напрямки технічного вдосконалення приводів, у яких ротори приводяться в обертання і утримуються в необхідному положенні без безпосереднього механічного контакту між деталями, що здійснюють відносний рух. Показана доцільність розгляду безконтактних приводів як єдиної механічної системи, обґрунтовано ефективність регулювання їх опорної системи для розширення діапазонів швидкісних режимів, підвищення жорсткості і несучої здатності, зниження експлуатаційних витрат.

Ключові слова: аєростатична опора, газове мастило, прямий привід, вантажонідоїмність, жорсткість.

SYSTEM APPROACH FOR DIRECT NON-CONTACT DRIVES IMPROVEMENTS

Nosko P. L., Professor, Breshev V. E., Candidate of Engineering Sciences,
Breshev A. V., Pankratova S. S.

*East-Ukrainian National University named after V. Dahl,
Soviet Avenue, 59A, Severodonetsk, 93406, Ukraine*

abreshev@gmail.com

Key ways of drives technical improvements with rotors that supported by no mechanical contacts between parts have been systemized. Non-contact drives are considered as one single mechanical system. An efficiency of support system adjustment for range extension of speed modes, stiffness and load capacity raise, operating costs decrease has been explained. The differences between radial and thrust gas-lubricated bearings have been investigated in this work. Different types of thrust gas-lubricated bearings have been shown. The conventional bearings have typical solutions of Reynolds equation, which allows improved solutions for base bearing modeling and analysis. Use of this approach over numerical calculation of complex bearing design is the definition of functional relations between its parameters. The ways of air-bearing non-contact drive modernization for improvement its operating characteristics have been determined and implemented. A design model of transforming complex surfaces to simple equivalent ones for calculation integral parameters of non-contact drive on conical bearings has been designed. Advantages of single-support system modernization have been received through Reynolds equation solution by perturbation method. Parameters of air-bearing system and initial one have been compared. The approximate analytical solution of Reynolds equation for complex design bearing has been used for investigation. Such bearings have variable curvature bearing faces, uneven feeding of gas-film lubrication and unsymmetrical distribution of thermodynamic parameters in a gap, that makes difficult to find analytical solution in respect to integral characteristics, such as load capacity and stiffness. An approach of transforming complex aerostatic design bearing to a combination of similar conventional bearings (i.e. load capacity and stiffness of both bearing are equal) is suggested in this work.

Key words: aerostatic support, air lubricant, direct drive, load capacity, stiffness.

ВВЕДЕНИЕ

Одноопорные и многоопорные бесконтактные приводы на аэроостатических опорах имеют сходную структуру, общие принципы конструирования, близкие или одинаковые методики расчета характеристик, анализа статической и динамической устойчивости. На этом основании являются сходными также направления их технического совершенствования. Наиболее сложными научно-техническими задачами при модернизации приводов на аэроостатических опорах являются обеспечение требуемой динамической устойчивости и достаточной несущей способности во всем диапазоне скоростных режимов и нагрузок. С этой целью бесконтактные приводы исследуются как единая механическая система, в которой взаимно согласуются различные направления модернизации и вводится регулируемость опорной системы (системы конических аэроостатических опор) по величине среднего зазора с воздушной смазкой.

1. НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРИВодОВ

Под техническим совершенствованием приводов, которое также можно в сопоставлении рассматривать как повышение технического уровня, мы понимаем изменения в технологии изготовления, конструкции, настройках и регулировании, условиях (режимах) эксплуатации, приводящие к позитивному или требуемому изменению характеристик и параметров, эксплуатационных (потребительских) свойств в сравнении с существующими изделиями. Как правило, данные характеристики и параметры, эксплуатационные качества определяются в техническом задании на новое изделие, а затем отражаются в эксплуатационной документации. В работах [1, 2] показано, что для приводов вращения техническое совершенствование связано с:

- расширением диапазона частот вращения ротора;
- снижением потребляемой мощности и повышением КПД;
- уменьшением массогабаритных параметров;
- уменьшением расхода технологического воздуха на аэростатические опоры;
- повышением точности регулирования положения ротора (допустимые биения, люфты и т.д.), частоты вращения при условии обеспечения динамической устойчивости;
- увеличением номинальной и максимальной нагрузочных способностей в аксиальном и радиальном направлениях;
- регулируемостью жесткости в аксиальном и радиальном направлениях;
- снижением уровней шума и вибраций;
- увеличением средней наработки на отказ, расчетного технического ресурса.

В зависимости от предназначения данного конкретного привода, существенный характер могут приобретать и другие параметры, например, время выхода на рабочий режим, время непрерывной работы, диапазон допустимых температур и др. Разработка приводов бесконтактного типа как единой механической системы позволяет добиться положительного эффекта практически по всем перечисленным позициям.

При разработке новой конструкции пневмошпинделя были также реализованы технические решения, характерные исключительно для многоопорных систем. Наиболее эффективное из них – переход на конические аэростатические опоры. Он позволил двумя коническими опорами заменить четыре – две радиальные и два подпятника, соответствующие традиционной конструкции опорных систем приводов. На следующем этапе совершенствования конструкции было предложено применение в приводах конических опор различной геометрии (по углу наклона несущей поверхности, длине и т.д.). Сравнительный расчет характеристик многоопорной системы традиционной конструкции и модернизированного многоопорного пневмошпинделя на одинаковых конических опорах, а затем и на опорах различной геометрии, показал следующее. При условии равенства предельной допустимой рабочей радиальной нагрузки, приложенной к концевому участку вала, применение одинаковых конических опор позволяет снизить массу привода на 11%, габариты на 17,3%, расход технологического воздуха на 25% (четыре линии дренажа вместо восьми). Использование же в приводе конических опор различной геометрии снижает массу и габариты привода дополнительно до 8% [1, 3].

2. АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСИЛЕНИЯ ОДНОЙ ИЗ ОПОР И РЕГУЛИРОВАНИЯ ВСЕЙ ОПОРНОЙ СИСТЕМЫ

В методологии проектирования многоопорного привода на конических аэростатических подшипниках принципиальным является изначальное рассмотрение привода как единой регулируемой механической системы [3]. Нами для регулирования была выбрана величина зазора с воздушной смазкой – параметр, который оказывает существенное влияние на жесткость, несущую способность, и собственные частоты аэростатических опор [4-6]. Для анализа регулируемости рассмотрен пневмошпиндель с усиленной правой опорой

посредством зенковки питателей и созданием на ее подвижной конусной поверхности лабиринтных проточек внутри зазора (рис. 1).

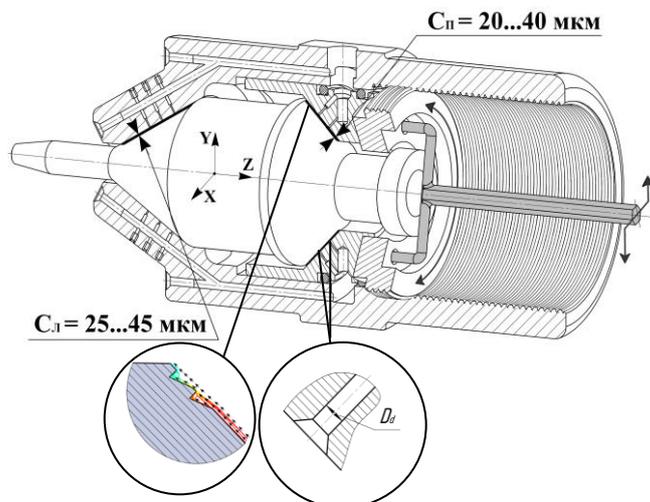


Рис. 1. Пневмошпиндель с усиленной (модернизированной) правой опорой

Усиление правой опоры зенковкой и лабиринтными проточками выполнено с ограничениями по добавляемому объему зазора – не более 20% – для обеспечения динамической устойчивости [4]. В результате произошел заметный рост подъемной силы правой конической аэростатической опоры в радиальном и осевом направлениях за счет увеличения давления смазки по зазору, что подтверждается компьютерным расчетом поля давлений смазки в программе CFD анализа (рис. 2).

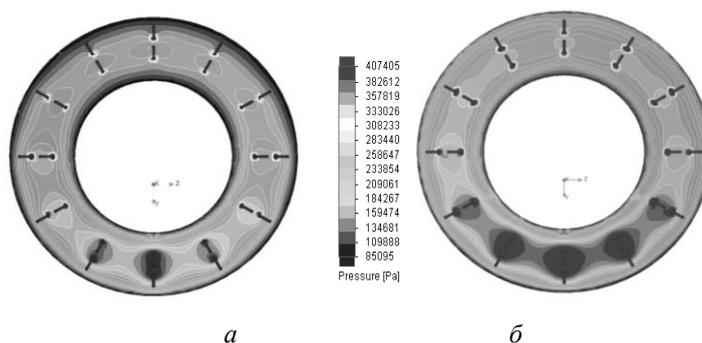


Рис. 2. Распределение давления в зазоре правой опоры до (а) и после (б) ее усиления

Результаты CFD анализа правой опоры пневмошпинделя показали, что после раззенковки выходных кромок питателей и создания прямоточных лабиринтов на подвижной несущей поверхности, получено увеличение осевой подъемной силы $W_{ЗКП}$ на 47% и более (без лабиринтов – около 35%), радиальной грузоподъемности $W_{УКП}$ на 4,7%, но при этом наблюдается повышение расхода воздуха $Q_{п}$ опоры на 26%. Важно отметить, что усиление правой опоры приводит к еще более выраженному усилению левой опоры (повышению ее несущей способности и жесткости) и всего привода. Существенно изменяются свойства механической системы пневмошпинделя, увеличивается диапазон регулирования его опорной системы по величине среднего зазора. Это происходит в результате самоустанавливающегося перехода опор на новые величины зазоров (указаны на рис. 1.), соответствующие равновесию ротора в аэростатическом подвесе. Более, чем в 2 раза расширяется диапазон возможного регулирования зазора в левой опоре (от 38...44 мкм до диапазона 27...44 мкм).

Если до усиления правой опоры радиальная несущая способность пневмошпинделя составляла 60 Н, то после усиления – 71 Н (+18,5%). При этом, за счет перераспределения величин зазоров, расход технологического воздуха правой модернизированной опоры увеличился с 2,02 м³/ч до 2,70 м³/ч, а левой уменьшился с 3,5 м³/ч до 1,8 м³/ч, расход воздуха всего пневмошпинделя сократился на 1,02 м³/ч (на 38%).

Изменение самоустанавливающихся зазоров в опорной системе пневмошпинделя и диапазона регулирования левой опоры после усиления правой показаны на рис. 3.

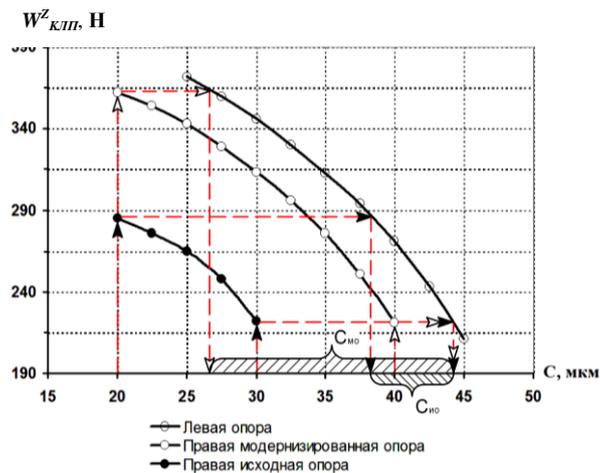
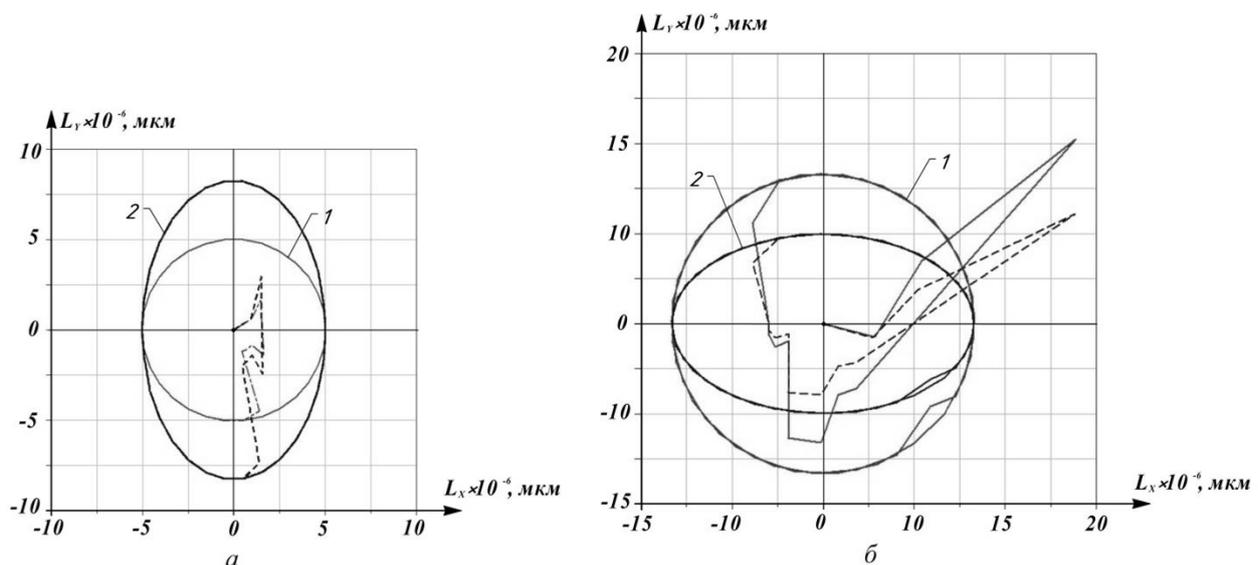


Рис. 3 Диапазон регулирования левой опоры

Динамика ротора была исследована с помощью численных расчетов траекторий движения центров масс опор, выполненных в программе инженерного анализа (САПР). Расчет траекторий «орбитальных движений» опор при некоторой тарированной неуравновешенности показал, что после усиления правой конической опоры амплитуды колебаний или орбитального движения как правой, так и левой аэростатических опор значительно уменьшаются. Это происходит в условиях приложения внешней нагрузки, а также и без нее.

Левая опора до усиления правой работает на среднем зазоре $C = 38$ мкм, а после – на зазоре $C = 27$ мкм, что является следствием модернизации правой опоры и расширения всего диапазона регулирования опорной системы пневмошпинделя по величине средних зазоров с воздушной смазкой. Таким образом, за счет усиления правой опоры повышается динамическая устойчивость и расширяется диапазон регулирования обеих опор и всей механической системы пневмошпинделя.

На рис. 4. показана траектория движения (колебаний) центра масс левой конической аэростатической опоры пневмошпинделя как после усиления правой опоры, так и до этого. В каждом случае рассмотрен холостой ход (без нагрузки), который соответствует отсутствию относительного эксцентриситета аэростатической опоры ($\epsilon = 0$), а также движение под радиальной нагрузкой, близкой к максимальной ($\epsilon = 0.8$).



1 – колебания опоры без нагрузки ($\epsilon = 0$); 2 – колебания опоры под нагрузкой ($\epsilon = 0,8$)

Рис. 4. Орбитальное движение левой опоры после (а) и до (б) усиления правой опоры привода

Влияние регулирования среднего зазора C опор и усиления правой опоры (зенкованием и лабиринтными проточками) на статические характеристики аэростатических опор и всего пневмошпинделя [3], при варьировании величины среднего зазора C для давлений подачи технологического воздуха 4 атм. и 5 атм. показаны на рис. 5.

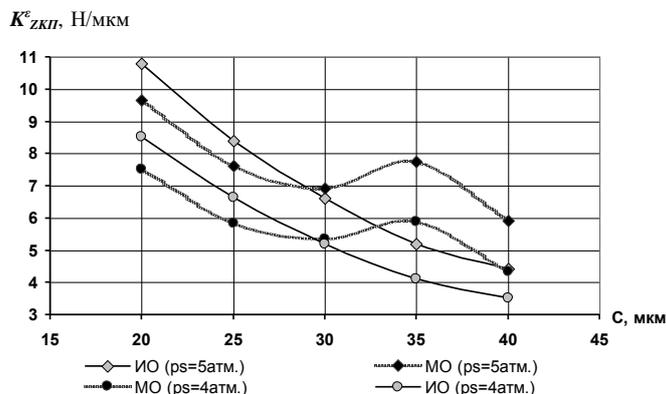


Рис. 5 Осевая жесткость правой опоры в зависимости от зазора

На рис. 5 характеристика правой опоры после усиления отмечена как «МО», а в исходном состоянии – «ИО». За счет варьирования величины зазора осевая жесткость правой опоры может регулироваться по величине до 41%, при этом усиленная опора обладает более равномерной жесткостью во всем диапазоне регулирования. Характер изменения радиальной жесткости $K^{\varepsilon}_{ХКП}$ показан на рис. 6.

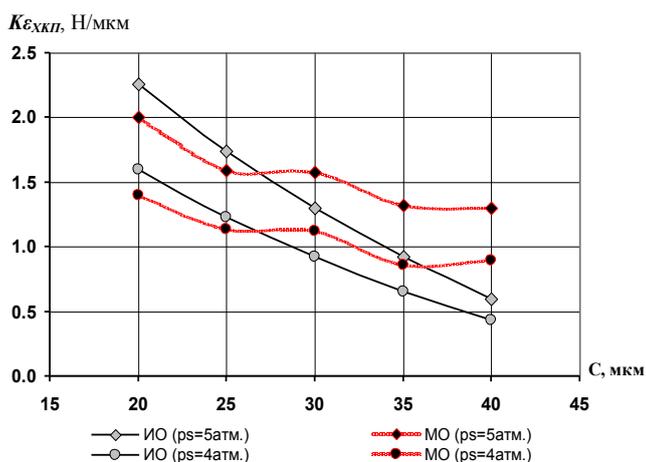


Рис.6. Радиальная жесткость правой опоры зазора

Регулирование радиальной несущей способности $W^{XY}_{КП}$ правой опоры за счет изменения величины среднего зазора C показано на рис. 7.

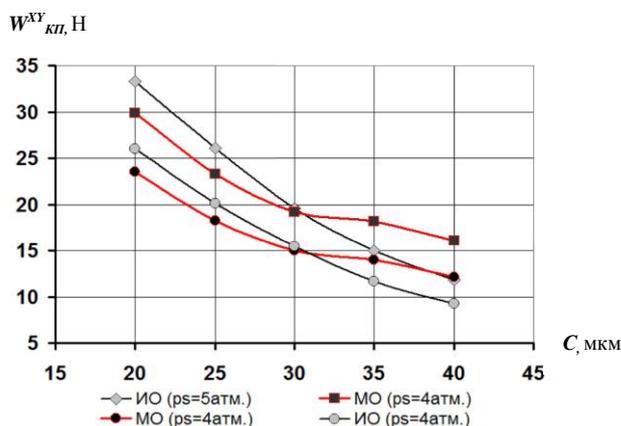


Рис. 7. Регулирование радиальной несущей способности величиной зазора

Для левой конической опоры зависимость осевой и радиальной жесткостей, радиальной несущей способности имеют аналогичный и более равномерный характер.

В целом результаты расчетов жесткостей и несущих способностей левой и правой опор пневмошпинделя показывают, что изменение величины их среднего зазора обеспечивают регулирование статических и динамических характеристик в широком диапазоне и однонаправлено. На этой основе обеспечивается регулируемость характеристик всего привода.

Регулирование зазоров конической опорной системы бесконтактного привода (пневмошпинделя) позволяет изменять радиальную подъемную силу до 13%, осевую – до 21%, жесткость – до 40%, собственные частоты колебаний – до 28%, что предоставляет возможность настраивать бесконтактный привод под условия применения по назначению.

ВЫВОДЫ

Системный подход к техническому совершенствованию приводов бесконтактного типа показал свою эффективность, так как основан на представлении привода как единой механической системы. В ней конструктивно и параметрически взаимно согласуются различные технические решения, диапазоны регулирования параметров и т.п., а критерием согласованности является обеспечение статической и динамической устойчивости механической системы привода.

Применение конических аэростатических опор позволяет реализовать регулируемость опорной системы по величине средних зазоров опор и обеспечить регулирование жесткости, несущей способности, собственных частот колебаний опор и всего привода, выполнять настройку его механической системы. Кроме того, применение конических опор различной геометрии позволяет снизить массу привода до 19%, габариты до 25,3%, расход технологического воздуха до 38%, увеличить радиальную несущую грузоподъемность до 18,5%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брешев А. В. Модернизация конструкции многоопорного бесконтактного привода на аэростатических подшипниках / А.В. Брешев, А.П. Карпов, В.Е. Брешев // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2012. – № 6(177). – С. 339-344.
2. Брешев В. Е. Пути повышения технического уровня бесконтактных приводов рабочих машин / В.Е. Брешев // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2012. – № 3(174) Ч.2. – С. 23-27.
3. Брешев В. Е. Разработка пневмошпинделя на регулируемых конических аэростатических опорах различной геометрии / В.Е. Брешев // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2013. – № 15(204) Ч.3. – С. 229-232.
4. Пинегин С. В. Прецизионные опоры качения и опоры с газовой смазкой : Справочник / С.В. Пинегин, А.В. Орлов, Ю.Б. Табачников. – М. : Машиностроение, 1984. – 216 с. – (Основы проектирования машин).
5. Константиnescу В. И. Газовая смазка / В.И. Константиnescу ; пер. с рум. Г.П. Махо ; под ред. М.В. Коровчинского. – М. : Машиностроение, 1968. – 709 с.
6. Шейнберг С. А. Опоры скольжения с газовой смазкой / С.А. Шейнберг, В.П. Жедь, М.Д. Шишеев. – М. : Машиностроение, 1979. – 335 с. – (2-е издание).

REFERENCES

1. Breshev, A.V., Karpov, A.P. and Breshev, V.E. (2012), “ Upgrading the designs of multisupport contactless the actuator on aerostatics bearings”, *Visnik Skhidnoukraïns'kogo nacional'nogo universitetu imeni Volodimira Dallya*, no. 6(177), pp. 339-344.
2. Breshev, V.E. (2012), “ Ways of increasing technical level of contactless actuators of working machines”, *Visnik Skhidnoukraïns'kogo nacional'nogo universitetu imeni Volodimira Dallya*, no. 3(174), part 2, pp. 23-27.

3. Breshev, V.E. (2013), "Development pnevmoshpindelya on adjustable conical aerostatic supports different geometry", *Visnik Skhidnoukraiïns'kogo nacional'nogo universitetu imeni Volodimira Dalya*, no. 15(204), part 3, pp. 229-232.
4. Pinegin, S.V., Orlov, A.V. and Tabachnikov, Yu.B. (1984), *Pretsizionnyie oporyi kacheniya i oporyi s gazovoy smazkoy: Spravochnik* [Precision bearings and roller bearings with gas greasing: Handbook], Mashinostroenie, Moscow.
5. Konstantinesku, V.I. (1968), *Gazovaya smazka* [Gas grease], Translated by Rum. G.P. Maho, Edited by M.V. Korovchinskogo, Mashinostroenie, Moscow.
6. Sheynberg, S.A., Zhed, V.P. and Shisheev, M.D (1979), *Oporyi skolzheniya s gazovoy smazkoy* [Of legs sliding with gas greasing], 2nd edit., Mashinostroenie, Moscow.

УДК 539.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОРТОТРОПИИ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ТОРОИДАЛЬНЫХ ОБОЛОЧЕК ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ

¹Григоренко Я. М., академик НАНУ, главный научный сотрудник,
¹Авраменко О. А., к.ф.-м. н., научный сотрудник, ²Авраменко Ю. А., доцент

¹*Институт механики им. С.П. Тимошенко НАН Украины,
ул. Нестерова, 3, Киев, 03057, Украина*

²*Запорожская государственная инженерная академия,
просп. Ленина, 226, Запорожье, 69000, Украина*

auagrigorenko@yandex.ru

Проведено исследование напряженно-деформированного состояния замкнутых усеченных тороидальных оболочек переменной толщины в зависимости от ортотропии материала. Задача решалась на основании уточненной теории оболочек типа Тимошенко. Приводятся данные о распределении полей перемещений и напряжений в зависимости от искривления оси оболочки, её толщины и изменения параметров ортотропии материала.

Ключевые слова: тороидальная оболочка, напряженно-деформированное состояние, уточненная теория оболочек.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ОРТОТРОПІЇ НА НАПРУЖЕНО- ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ТОРОЇДАЛЬНИХ ОБОЛОНОК ЗМІННОЇ ТОВЩИНИ

¹Григоренко Я. М., академік НАНУ, головний науковий співробітник,
¹Авраменко О. О., к. ф.-м. н., науковий співробітник, ²Авраменко Ю. О., доцент

¹*Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України,
вул. Нестерова, 3, м. Київ, 03057, Україна*

²*Запорізька державна інженерна академія,
просп. Леніна, 226, Запоріжжя, 69000, Україна*

auagrigorenko@yandex.ru

Проведено дослідження напружено-деформованого стану замкнутих усічених тороїдальних оболонок змінної товщини залежно від ортотропії матеріалу. Задача розв'язувалась на підставі уточненої теорії оболонок типу Тимошенка. Наводяться дані про розподіл полів переміщень і напружень залежно від викривлення осі оболонки, її товщини і зміни параметрів ортотропії матеріалу.

Ключові слова: тороїдальна оболонка, напружено-деформований стан, уточнена теорія оболонок.