

А.И. ЧАЙКА, к. т. н., Харьков, НАКУ им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”,
В.А. ЧАЙКА, инженер, Харьков, ГП ХАКБ

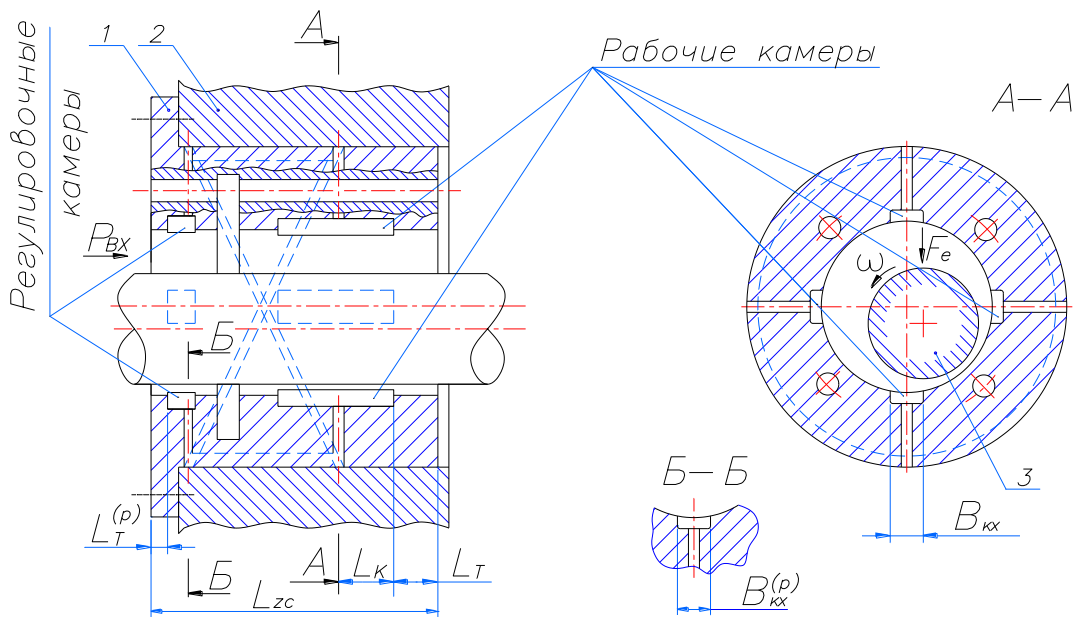
**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК
ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ РАДИАЛЬНЫХ ПОДШИПНИКОВ
ЖИДКОСТНОГО ТРЕНИЯ И ПОВЕДЕНИЯ В НИХ ШЕЕК
РОТОРОВ**

Results of the comparative analysis of characteristics of high-speed radial bearings of liquid friction of separate types and behaviour in them journal of rotors are resulted. At the end of clause the general recommendations and generalizations are made.

Выбор типа радиальных подшипников жидкостного трения (РПЖТ) опорных узлов имеет важное практическое значение при проектировании высокоскоростных машин и агрегатов. Анализ работ [1 – 4 и др.] показывает, что эта проблема решена на низком уровне даже применительно к наиболее изученным РПЖТ – подшипникам гидродинамического типа. Еще хуже ситуация обстоит с РПЖТ гидростатического типа [5 – 9]. В выполненных на настоящее время в рассматриваемой области работах, в большинстве случаев рассматривались статические характеристики РПЖТ, работающих при ламинарном течении смазочного материала (СМ), не решены и задачи методологического характера [1 – 9]. Одновременное изучение характеристик высокоскоростных РПЖТ и поведения роторов на них являлось предметом исследования в весьма ограниченном числе работ [6, 8 и др.]. Современный уровень разработки проблемы сравнительного анализа характеристик высокоскоростных РПЖТ находится, в основном, на стадии накопления данных [1, 2, 5 – 9]. Имеющиеся результаты исследований касаются РПЖТ отдельных типов, работающих при стационарных режимах, в них представлено ограниченное число (в основном статических) характеристик подшипников. Нередко материалы сравнительного анализа носят дискуссионный характер [2, 3, 5 и др.].

В настоящей статье рассматриваются основные результаты сопоставления характеристик высокоскоростных РПЖТ и поведения в них шеек роторов. Основными задачами исследований являлись: получение с использованием разработанных ранее методов [6, 7, 10] результатов расчета характеристик РПЖТ рассматриваемых типов [втулочных РПЖТ

гидростатического типов (ГСП) с неподвижными рабочими поверхностями и жиклерами, ГСП с взаимобратным щелевым дросселированием (ГСП ВОЩД, рис. 1), ГСП с подвижными сегментами] и кинематических параметров роторов; сравнение характеристик РПЖТ и поведения в них шеек роторов; изучение влияния на расширенный спектр характеристик указанных элементов [включая и динамические характеристики (ДХ) роторов] значений отдельных параметров и факторов (нестационарности движения и колебаний ротора, нелинейности гидродинамических, гидростатодинамических сил и др.); обобщение результатов исследований.



Г

В
С

Тематическим планом НИУ на 2000-2002 гг., утвержденным министерством образования и науки Украины (направление 4: экологически чистая энергетика и ресурсосберегающие технологии).

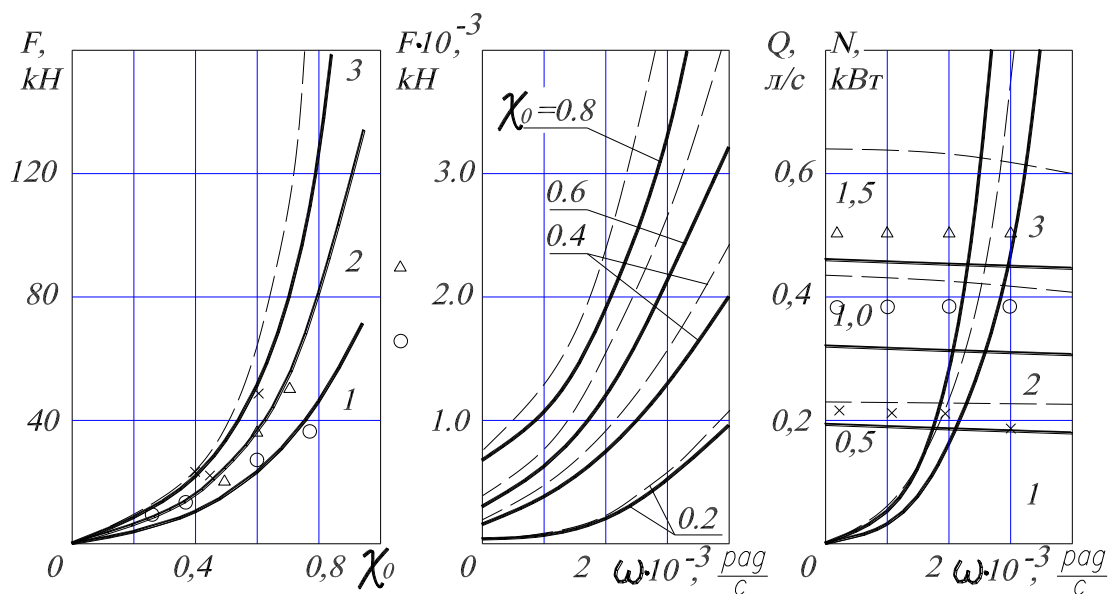
Теоретической базой для использованных расчетных методов явились материалы работ [6, 9, 11]. В методах расчета предполагается, что смазочный материал представляет собой несжимаемую ньютоновскую жидкость, однородную по составу; подшипники работают при нестационарном режиме. Другими особенностями является учет действительного характера течения (ламинарного или неламинарного) СМ в основных трактах РПЖТ, совместное рассмотрение исходных уравнений и зависимостей, одновременное рассмотрение расширенного спектра характеристик [мгновенных, экстремальных и осредненных за время одного цикла значений затрат мощности на трение ($N_{тр}$), угла положения центра шейки, расхода (Q) СМ и т.д.] и критериев работоспособности (минимальной толщины смазочного слоя, максимальной температуры СМ, амплитуд колебаний центра шейки ротора) РПЖТ и кинематических параметров шейки ротора.

Для описания физических процессов в подшипниках выбрана система дифференциальных уравнений и зависимостей, включающая уравнение Рейнольдса, баланса энергии, уравнения баланса расходов СМ,

прокачиваемых через каждую из камер (для ГСП); зависимости для радиального зазора, вязкости и плотности СМ; дифференциальные уравнения движения центра шейки, а также краевые условия.

Исходные уравнения решались, в основном, численными методами [6, 7, 9, 10 и др.]. Методы решения уравнений, алгоритмы расчета характеристик РПЖТ и параметров центра шейки приведены в указанной литературе. Использованные методы расчета и алгоритмы реализованы в виде комплекса программ, написанных на языках “Фортран” и “Паскале” применительно к ПЭВМ типа IBM.

Исследования показали, что при близких значениях геометрических и рабочих параметров и невращающемся роторе грузоподъемность (F) втулочных ГСП ВОЩД на 8,...,20 % выше, чем грузоподъемность втулочных ГСП с жиклерной компенсацией давления (ГСПЖ). В большинстве случаев подшипники имеют одинаковый характер нагрузочных характеристик. При этом нагрузочные характеристики (рис. 2 а) ГСП ВОЩД [длина участка регулировочных камер $L_T^{(P)}=0.030$ м, длина торцевых перемычек $\tilde{L}_T^{(P)}=0.010$ м; (рис. 1)] имеют более жесткий характер, чем у ГСП с жиклерной компенсацией давления СМ (радиус жиклеров $r_d=0.5 \cdot 10^{-3}$ м). Диаметр расточки подшипников $D=0.04$ м, осевая длина $L_Z=0.065$ м, длина торцевых перемычек $L_T=0,01$ м, число камер $Z_K=8$, окружная длина рабочих и регулировочных камер $B_{КХ}=0.004$ м, радиальный зазор $h_0 = 0.105 \cdot 10^{-3}$ м. В



качестве СМ использовалась техническая вода при $T_{ВХ}=40$ °С.

а)

1- $P_{ВХ}=0.4$ МПа, 2-0.8 МПа,
3-1.2 МПа.

б)

в)

1- $P_{ВХ}=0.8$ МПа,
2-3.0 МПа, 3-6.0 МПа.

Рис. 2. Статические характеристики ГСП с жиклерами и ГСП ВОЩД (пунктирные линии) при различных значениях рабочих параметров.

Увеличение угловой скорости ротора от 0 до 4000 рад/с при относительном эксцентриситете шейки $\chi_0=0.2, \dots, 0.8$ приводит к большему росту грузоподъемности ГСП ВОЩД, чем грузоподъемности ГСПЖ (рис. 2 б). Объясняется это большей общей длиной первого подшипника (за счет участка с регулировочными камерами). При одинаковой длине подшипников сравниваемых типов за счет большей сплошности рабочей поверхности соотношение грузоподъемностей противоположное.

Закономерности изменения расходов (кривые 1-3) СМ и затрат мощности на трение (возрастающие кривые) в ГСП рассматриваемых типов одинаковы (рис. 2 в). Отличия имеются только в их значениях. Сплошные кривые на рисунках относятся к характеристикам ГСПЖ, пунктирные – к ГСП ВОЩД. Исключение – пунктирная кривая, отражающая результаты экспериментального исследования потерь мощности на трение в ГСПЖ.

Расчетные значения статических характеристик ГСПЖ рис. 2 а и рис. 2 в удовлетворительно согласуются с данными экспериментов. Максимальные отличия указанных значений имеют место по расходу СМ и составляют до 23, ..., 27 %.

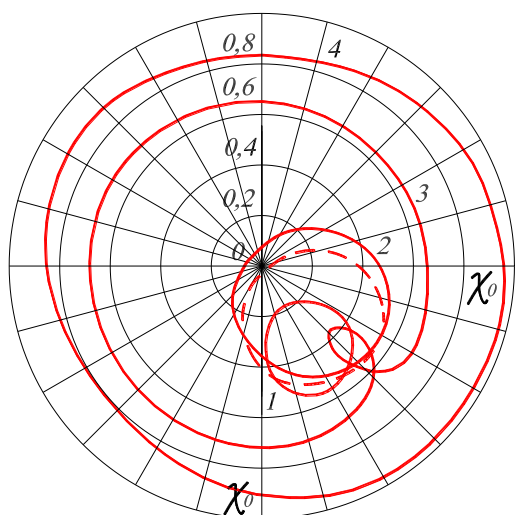
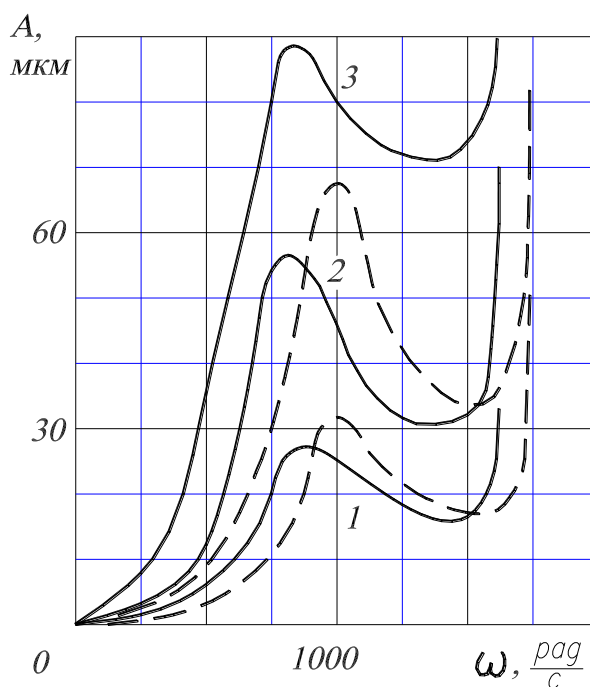


Рис. 3. Траектории центра шейки ротора во втулочном ГСП и ГСП ВОЩД при различной угловой скорости ротора:

- 1 - $\omega=400$ рад/с; 2 - 850 рад/с;
- 3 - 1200 рад/с; 4 - 1600 рад/с.



Получено, что форма расчетных траекторий центра шейки при различных значениях угловой скорости ротора (масса $M_p=395$ Н, дисбаланс $D_{CT}=0.4 \cdot 10^{-3}$ Н·м) в ГСП ВОЩД и в ГСПЖ отличаются мало. Для примера на рис. 3 пунктирной линией показана траектория центра шейки в ГСПЖ при ω

= 850 рад/с. Кривые 1 и 2 соответствуют движению шейки ротора в ГСП ВОЩД в устойчивой зоне.

Характер изменения амплитуд колебаний центров шеек в ГСПЖ (сплошные линии) и в ГСП ВОЩД (пунктирные линии) с изменением угловой скорости ротора показан на рис. 4. Особенностью графических зависимостей этого рисунка является наличие двух зон повышенных амплитуд колебаний - резонансной зоны ($\omega = 740, \dots, 960$ рад/с) и зоны практической потери устойчивости движения ротора ($\omega_y = 1580, \dots, 1630$ рад/с).

Применение ГСП ВОЩД согласно рис. 4 увеличивает до 8, ..., 15 % значения критических (резонансной скорости и скорости, соответствующей началу потери устойчивости движения) скоростей.

Из последнего рисунка следует также, что амплитуды колебаний имеют приемлемые значения (менее, 30 МКм, что составляет 20, ..., 30 % от значения радиального зазора) при неуравновешенности $D_{CT} < 0.004$ Н м и угловой скорости ротора $\omega < 1500$ рад/с.

Расчеты показали также, что нагруженность опор центробежной силой от неуравновешенности ротора обуславливает колебания их шеек и существенное изменение статических характеристик (расхода СМ - до 40 %, потерь мощности на трение - до 35 %, средней температуры СМ до 32 %) ГСП рассмотренных типов.

Выполненные исследования позволили также оценить значения характеристик РПЖТ и поведения шеек роторов при различных значениях радиального зазора, положений, размеров и числа камер подшипников, влияние неизотермичности и неламинарности течения СМ и других факторов на характеристики подшипников и поведение в них шеек. Количественные изменения характеристик ГСП рассмотренных типов во многом определяются их режимом работы (гидростатическим, гидростатодинамическим и гидродинамическим).

Сопоставление характеристик ГСП ВОЩД, ГСП с жиклерами с характеристиками ГСП с самоустанавливающимися сегментами (ГСП СС, имеющих одинаковые или близкие значения параметров), приведенными в наших работах [6, 7, 12], показало, что для первых РПЖТ характерно большие значения грузоподъемности и затрат мощности на трение. По влиянию на критические скорости ГСП СС более эффективней, чем втулочные ГСП и ГСП с неподвижными сегментами. Однако ГСП СС конструктивно существенно сложнее, чем втулочные подшипники.

Основные выводы

1. Впервые выполнены совместные расчеты расширенного спектра статических характеристик и критериев работоспособности втулочных РПЖТ [ГСП с жиклерной компенсацией давления СМ, ГСП с взаимобратным щелевым дросселированием, работающих при стационарном и нестационарном режимах], а также траекторий центров шеек и АЧХ роторов.

2. Сравнение характеристик РПЖТ исследованных типов, и поведения в них шеек роторов выявило следующее:

- траектории центров шеек роторов в ГСП ВОЩД подобны траекториям шеек в ГСП с жиклерами;

- динамические характеристики шеек роторов в ГСП ВОЩД более благоприятны, чем в ГСП с жиклерами. Однако отдельные статические характеристики (затраты мощности на трение, расход СМ и др.) первых ГСП часто хуже (больше), чем в ГСП второго типа;

- АЧХ шеек роторов во втулочных ГСП рассмотренных типов уступают АЧХ шеек в ГСП с подвижными сегментами.

Список литературы: 1. *Воскресенский В.А., Дьяков В.И., Зиле А.З.* Расчет и проектирование опор жидкостного трения: Справочник. - М.: Машиностроение, 1983. - 232 с. 2. *Олимпиев В.И., Камский А.В.* Сравнительный анализ антивибрационных свойств эллиптических и сегментных подшипников // Энергомашиностроение. - 1977. - № 2. - С. 15-17. 3. Подшипники скольжения энергетических роторных машин // Энергетическое машиностроение: Обзорная информация / Вахрамов Н.А., Новинский Э.Г. и др. - М., 1985. - Вып. 12. - 41 с. 4. *Орлов П. И.* Основы конструирования: Справочно-методич. пособие. В 2-х т. / Под ред. П.Н. Учаева.-М.: Машиностроение, 1988. 5. *Герасименко С.С., Иванов А. А.* Подшипники герметичных насосов. - Минск: Наука и техника, 1989. - 159 с. 6. Гидростатические опоры роторов быстроходных машин / *Артеменко Н.П., Чайка А.И., Доценко В.Н. и др.* // Харьков: "Основа". - 1992. - 197 с. 7. *Чайка А.И.* Расчет и проектирование радиальных гидростатических подшипников: Учебн. пособие. - Харьков: ХАИ. - 1992. - 109 с. 8. *Чайка А.И., Кантемир А.Д., Иващенко Е.И.* Исследование и разработка радиальных подшипников жидкостного трения современных турбомашин // Тр. V111-ой междунар. научно-технич. Конф. "Насосы-96", т. 2, Украина. - г. Сумы. ИПП "Мрія". - 1996. - С. 163-171. 9. *Чайка А.И.* Классификация и результаты исследований высокоскоростных подшипников жидкостного трения с регулируемыми характеристиками: Тр. Национ. технич. университета "ХПИ". - Харьков: ХПИ. - 2001. - С. 36-41. 10. *Чайка А.И.* Аналитико-численное решение нестационарной задачи смазки высокоскоростных радиальных подшипников жидкостного трения // Авиационно-космическая техника и технология. Сб. научн. трудов. - Вып. 10. - Харьков: ХАИ. - 2000. - С. 199-204. 11. *Чайка А.И.* Прикладная теория высокоскоростных радиальных подшипников жидкостного трения // Авиационно-космическая техника и технология: Сб. научн. трудов. - Вып. 6. - Харьков: ХАИ. - 1998. - С. 172-177. 12. *Назин В.И., Пономарев В.В., Чайка А.И.* Результаты экспериментального исследования амплитудно-частотных характеристик роторов на гидростатических подшипниках с подвижными и неподвижными сегментами // Исследование гидростатических опор и уплотнений двигателей летательных аппаратов. Харьков: ХАИ. - 1986. - Вып. 2. - С. 21-32