

УДК 534; 531.391

ВОЛНОВЫЕ РЕЗОНАНСЫ И УСТОЙЧИВОСТЬ СТАЦИОНАРНОГО ВРАЩЕНИЯ РОТОРНЫХ СИСТЕМ, СОДЕРЖАЩИХ ВЯЗКУЮ ЖИДКОСТЬ

© 2011 г.

*Н.В. Дерендяев¹, И.Н. Солдатов²*¹Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского²Нижегородский филиал Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН

derendyaevnic@rambler.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Рассматривается проблема устойчивости режимов стационарного вращения роторных систем, содержащих вязкую жидкость. Ранее для исследования устойчивости вращения таких систем был предложен и разработан [1] новый метод. Он позволил установить, что при возникновении неустойчивости режима стационарного вращения важно соотношение между внутренним трением в жидкости, содержащейся в роторе, и внешним демпфированием в опорах его оси. При этом получил объяснение известный экспериментальный факт, что потеря устойчивости режима стационарного вращения ротора, содержащего жидкость, может сопровождаться возникновением синхронной процессии. Этот специфический для роторных систем результат принципиально не может быть объяснён в рамках консервативных моделей.

Ключевые слова: роторные системы, вязкая жидкость, устойчивость.

Рассматриваемая проблема касается устойчивости режимов стационарного вращения роторных систем, содержащих вязкую жидкость. Ранее для исследования устойчивости вращения таких систем был предложен и разработан [1–4] новый метод. Предложенный метод оказался весьма эффективным при исследовании устойчивости режимов стационарного вращения типичных роторных систем на основе базовых моделей [5–7]. Он позволил установить, что при возникновении неустойчивости режима стационарного вращения важно соотношение между внутренним трением в жидкости, содержащейся в роторе, и внешним демпфированием в опорах его оси. При этом получил объяснение известный экспериментальный факт, что потеря устойчивости режима стационарного вращения ротора, содержащего жидкость, может сопровождаться возникновением синхронной процессии. Этот специфический для роторных систем результат принципиально не может быть объяснён в рамках консервативных моделей. Предложенный метод был также успешно применен в задаче об устойчивости стационарного вращения ротора с полостью, частично заполненной проводящей вязкой несжимаемой жидкостью, в магнитном поле [8].

Возмущенное движение вращающегося ротора с жидкостью в виде круговой процессии возможно только на границе областей с различной степенью неустойчивости в пространстве параметров задачи. Именно это утверждение положе-

но в основу нового метода исследования устойчивости. Выясняется, что движение типа круговой процессии возникает в результате резонансного возбуждения волны на поверхности жидкости, т.е. при совпадении частоты процессии ротора и частоты поверхностной волны.

Систематическое исследование волновых движений в слое вращающейся вязкой несжимаемой жидкости предпринято в [9–11]. При этом также рассмотрены случаи, когда жидкость обладает микрополярной структурой, помещена в магнитное поле, контактирует с упругоподатливыми стенками полости ротора, а также случай жидкости с инерционной свободной границей (флотирующая жидкость). Показано, что каждая инерционная волна может быть представлена как суперпозиция винтовых полей: так в вязкой жидкости две крупномасштабные винтовые гармоники формируют центральное ядро течения, а четыре связаны с пограничными слоями. Влияние упругости стенок полости ротора на волны учтено в рамках технической линейной теории тонких упругих оболочек. Во всех случаях получены дисперсионные уравнения и оценки парциальных частот волновых движений, а также, на их основе, – приближенные значения параметров и частот роторных систем, при которых возможны резонансные соотношения между частотой процессии ротора и собственными частотами волн в жидкости, частично его заполняющей. Полученные оценки использованы в построении областей устойчи-

ности режимов стационарного вращения в пространстве параметров. Заметим, что знание парциальных частот волн в жидкости необходимо также для правильного выбора параметров дискретных моделей роторных систем с жидкостью [12, 13].

На основе базовых моделей исследован характер границы области устойчивости. Для определения типа границ («опасные» или «безопасные») в уравнениях удержаны главные нелинейные члены. Показано, что при выходе (входе) из области устойчивости происходит закритическая (докритическая) бифуркация Андронова–Хопфа: от режима стационарного вращения «жестко» или «мягко» рождается периодическое движение в виде круговой (или эллиптической) прецессии.

Для исследования устойчивости роторных систем с жидкостью, угловая скорость которых поддерживается постоянной, и имеющих анизотропные опоры оси, предложено обобщение метода. Значения параметров, при которых происходит изменение степени неустойчивости в подобных системах, находятся из условия существования некоторого прецессионного движения.

Распределенные математические модели роторных систем с жидкостью, включающие в себя уравнение Навье–Стокса, являются достаточно сложными. Оказывается, возможно построение дискретных моделей, адекватно описывающих в главном динамику роторных систем. Описанию и анализу одной из таких моделей посвящена заключительная часть работы.

Работа поддержана РФФИ (проект №09-01-00356).

Список литературы

1. Дерендяев Н.В., Сандалов В.М. Об устойчивости стационарного вращения цилиндра, частично заполненного вязкой несжимаемой жидкостью // ПММ. 1982. Т.46. № 4. С. 578–586.
2. Дерендяев Н.В. Об устойчивости стационарного вращения цилиндра, заполненного стратифициро-

ванной вязкой несжимаемой жидкостью // ДАН СССР. 1983. Т. 272, № 5. С. 1073–1076.

3. Дерендяев Н.В., Сеняткин В.А. Условия устойчивости стационарного вращения цилиндра, заполненного слоисто-неоднородной вязкой несжимаемой жидкостью // ПМТФ. 1984. №1. С. 34–44.

4. Дерендяев Н.В. Бифуркация Андронова–Хопфа в динамике роторной системы, содержащей жидкость // ДАН СССР. 1988. Т. 301, №4. С. 798–801.

5. Дерендяев Н.В., Сандалов В.М. Устойчивость стационарного вращения ротора, заполненного стратифицированной вязкой несжимаемой жидкостью // Машиноведение. 1986. №1. С. 19–26.

6. Дерендяев Н.В., Сеняткин В.А., Сандалов В.М. Исследование устойчивости режима стационарного вращения ротора вокруг вертикальной оси на гидродинамических подшипниках // Прикладная механика. 1987. Т. 23, №12. С. 95–104.

7. Дерендяев Н.В., Сандалов В.М., Солдатов И.Н. О рождении периодического движения в задаче об устойчивости стационарного вращения вертикального ротора на гидродинамических подшипниках // Машиноведение. 1988. № 4. С. 98–103.

8. Дерендяев Н.В., Солдатов И.Н. Об устойчивости и автоколебаниях ротора, содержащего проводящую жидкость, в магнитном поле // ПМТФ. 2004. № 1. С. 12–22.

9. Дерендяев Н.В., Солдатов И.Н. Волновые движения в слое вращающейся вязкой несжимаемой жидкости // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2007. № 1. С. 151–155.

10. Солдатов И.Н. Гироскопические волны во вращающемся слое жидкости // ПМТФ. 2008. Т. 49, № 2. С. 15–20.

11. Дерендяев Н.В., Солдатов И.Н. Устойчивость стационарного вращения ротора, частично заполненного вязкой флотирующей жидкостью // ЖТФ. 2011. Т. 81, № 2. С. 135–137.

12. Дерендяев Н.В., Солдатов И.Н. Устойчивость стационарных движений роторной системы с жидкостью в рамках дискретной модели // ПММ. 2004. Т. 68. Вып. 6. С. 984–993.

13. Derendyaev N.V., Vostrukhov A.V., Soldatov I.N. Stability and Andronov – Hopf bifurcation of steady-state motion of rotor system partly filled with liquid: continuous and discrete models // Trans. ASME. J. of App. Mech. 2006. Vol. 73, N 4. P. 580–589.

WAVE RESONANCE AND STABILITY OF STEADY ROTATION OF ROTOR SYSTEMS CONTAINING VISCOUS LIQUID

N.V. Derendyaev, I.N. Soldatov

The problem of stability of a steady rotation of the rotor systems containing a viscous liquid is considered. Previously, a new method for investigation of stability of such systems was proposed and developed in our paper in Trans. ASME. J. Applied Mechanics, 2006, vol. 73, N 4. This method revealed that for the instability of the steady-state rotation, the relationship between internal friction in the liquid contained in the rotor and external damping in the supports of its axis is important. At the same time an explanation of the well-known experimental fact that the loss of stability of the steady-state rotation of the rotor containing liquid may be accompanied by a synchronous precession is received. This particular result for rotor systems in principle can not be explained in terms of conservative models.

Keywords: rotor systems, viscous liquid, stability.