**Разработка рациональной методики расчета роликовых подшипников для применения в задачах роторной динамики**

Чжан Хао (асп. каф. РК-5)

Для применения в задачах роторной динамики (в том числе авиационных двигателей) разработаны алгоритмы и программы вычисления матрицы жесткости 12×12 и вектора упругих сил 12×1 роликового подшипника. При этом каждое из колец рассматривалось как абсолютно жесткое тело с 6-ю степенями свободы, но локальные деформации колец от взаимодействия с роликами были учтены коэффициентами контактной жесткости. Матрица жесткости и вектор сил подшипника строились формальным дифференцированием энергии деформаций, поэтому для разработанной теории выбрано название «Энергетическая модель роликового подшипника» (ЭМРП). Энергия деформаций вычислялась с применением известного приема разбиения роликов на тонкие диски. Равновесное положение каждого из роликов между кольцами подшипника определялось из нелинейной системы алгебраических уравнений (тоже построенной энергетическим методом), для решения которой использовался всегда сходящийся квазиньютоновский метод.

ЭМРП показывает, что зависимости коэффициентов матрицы жесткости 12×12 подшипника от перемещений и поворотов являются существенно нелинейными. Модель обладает высоким быстродействием и хорошей точностью, что является решающим фактором для применения в задачах роторной динамики (модели подшипника из объемных конечных элементов практически не пригодны для этих целей из-за большого количества степеней свободы (десятки тысяч) и, как следствие, низкого быстродействия). Найденные относительные перемещениям роликов и колец позволяют вычислять распределение контактного давления между роликами и дорожками качения непосредственно при решении задач динамики роторных машин, что необходимо для расчета долговечности подшипников.

Разработанная методика была использована для построения нагрузочных характеристик роликовых подшипников различной конструкции. Выполнялось сопоставление результатов, полученных на основе ЭМРП, с численными и экспериментальными результатами других авторов, в частности, специалистов известной подшипниковой компании Германии – FAG. При этом учитывались центробежные силы и гироскопические моменты, действующие на ролики при вращении колец подшипника. Сопоставление показало хорошую точность разработанной модели.

С целью верификации ЭМРП выполнялись натурные эксперименты на универсальной испытательной машине Zwick/Roell Z100. Роликовый подшипник типа 12309КМ, закрепленный в специальном устройстве, обеспечивающем фиксацию наружного кольца (для исключения его изгиба), через жесткую штангу нагружался радиальной силой и моментом. Сравнение экспериментальных данных с численными результатами, полученными по ЭМРП, показало их хорошее соответствие.

Построенная в диссертации ЭМРП применялась непосредственно в имитационной задаче роторной динамики. Имитационная модель состояла из массивного жесткого ротора, опирающегося на два роликовых подшипника, установленных на подвижном основании. Исследовались переходные процессы, возникающие в системе при движении основания на вираже. Применялось трехмерное описание поворотов. При этом с целью преодоления проблемы «особых точек» была разработана новая методика кинематически точного разделения большого поворота на осевой (скаляр) и поперечный (вектор Эйлера). Указанное разделение поворотов позволяет обходиться без предположения о постоянстве осевой составляющей угловой скорости ротора и строить решение сразу в глобальной системе координат (без использования понятий относительного и переносного движения). Были рассчитаны колебания ротора при переходе от поступательного движения основания к движению по окружности (вираж), и найдены зависимости от времени динамических реакций в опорах ротора.

На основе ЭМРП и подходов, разработанных при решении указанной имитационной задачи, могут быть построены решения других практически важных задач роторной динамики с участием роторов и роликовых подшипников.

По результатам работы опубликовано 2 статьи и 2 статьи приняты к печати в журналах из списка ВАК, Scopus – 1 статья. Апробация: 8 докладов на российских и международных конференциях. Диссертация и слайды существенно переработаны после замечаний, полученных на предыдущем выступлении на научном семинаре каф. РК-5 в октябре 2018 г.