

**РОЛЬ ИССЛЕДОВАНИЙ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ
ВАЛОПРОВОДОВ В РАЗВИТИИ ДИНАМИКИ МАШИН
(ИСТОРИЯ ПРОБЛЕМЫ)**

А. А. Ларин

Задача о крутильных колебаниях валопроводов была одной из первых практических задач теории механических колебаний и сыграла заметную роль в ее развитии. Это обусловлено, во-первых, важностью задачи, а, во-вторых, ее сравнительной простотой. Именно для решения этой задачи были разработаны многие методы, применявшиеся в теории колебаний, и в ней были обнаружены новые колебательные явления.

В конце XIX века происходили многочисленные поломки пароводных валов, соединяющих машину с гребным винтом. Аварии происходили от усталостного разрушения при резонансных колебаниях, а порой сопровождалась также и поломкой паровой машины. Первые масштабные исследования этой проблемы провел немецкий корабельный инженер Г. Фрам. Его статья, опубликованная в 1902 г., вызвала большой интерес среди ученых и инженеров.

Для исследования крутильных колебаний валопроводов поршневых машин применяются дискретные механические модели цепной структуры, состоящие из абсолютно твердых дисков, соединенных невесомыми упругими связями. Способы ее построения уже к 1930-м гг. были достаточно хорошо изучены. Определение приведенных моментов инерции дисков и крутильных жесткостей осуществлялась по эмпирическим формулам. Большие трудности вызывало определение сопротивления и учет увлекаемой винтом массы воды.

Дифференциальные уравнения колебаний легко записываются в прямой форме без применения аппарата аналитической механики. В случае исследования колебаний линейной системы использование спектральной теории, позволяющей даже без записи дифференциальных уравнений решать задачи определения частот и форм свободных колебаний и находить амплитуды и фазы установившихся вынужденных колебаний.

Длительное время основным средством борьбы с крутильными колебаниями валопроводов была отстройка системы от резонанса, что требовало только определения частот и форм свободных колебаний. Для исследования колебаний валопроводов паровых машин и тихоходных дизелей применялись двух- и трехмассовые модели. Для них решение векового уравнения не составляет особого труда, и основным вопросом при исследовании крутильных колебаний является определение параметров дискретной системы. Появление быстроходных двигателей внутреннего сгорания облегченной конструкции привело к тому, что при крутильных колебаниях, кроме соединительных, стали деформироваться и коленчатые валы. Это обстоятельство вынудило рассматривать системы с большим числом степеней свободы. Для них расчеты свободных и вынужденных колебаний уже представляло серьезные затруднения. Что касается переходных режимов, то даже для системы с одной степенью свободы задача простым численным интегрированием дифференциального уравнения решена быть не могла. Крутильные колебания коленчатых валов проявились раньше изгибных или продольных, поскольку их частоты ниже других.

Для решения задачи о свободных колебаниях методы инженерами разрабатывались различные графические и численные методы расчетов, из которых наибольшее распространение получили методы, предложенные Гюмбелем, Хольцером и Толле для цепных неразветвленных систем. В 1930 г. В. П. Терских предложил метод расчета крутильных колебаний, основанный на записи уравнения частот в виде непрерывной дроби. Метод заключается в том, что корни данного уравнения, т.е. собственные частоты, определяются последовательными пробами. При этом номер частоты определяется по количеству узлов в полученной форме колебаний. В отличие от других, метод цепных дробей пригоден и для разветвленных систем. Расчетами собственных частот линейных крутильных систем занимались и харьковские ученые. Большой интерес представляют метод последовательных приближений формами колебаний И. М. Бабакова и метод А. М. Данилевского, основанный на приведении определителя векового уравнения к форме Фробениуса. Однако, несмотря на свою эффективность, они не нашли широкого применения в расчетной практике.

Поскольку сам факт попадания собственной частоты в рабочую зону еще не означает, что проявится явление резонанса, особенно не для основных гармоник возбуждения, важнейшим вопросом становится расчет вынужденных колебаний, а точнее определение напряжений кручения в валах при работе двигателя. В практике расчета резонансных амплитуд широкое распространение получили энергетические методы, основанные на том, что при установившихся колебаниях энергия, сообщенная системе возмущающими силами, равна энергии, рассеянной демпфирующими сопротивлениями. Наиболее распространенными из них были методы, предложенные Видлером и Льюисом. В их работах приведены примеры вычисления амплитуд вынужденных колебаний в валопроводах дизелей и данные о величине сопротивления гребного винта, генератора, цилиндров двигателя и внутреннего трения. Точность результатов здесь определяется точностью составления энергетического уравнения, и, поэтому большое внимание уделяется экспериментальному определению демпфирующих сопротивлений и получению формул, достаточно хорошо отражающих количественные значения работы демпфирующих сил. Для расчета нерезонансных колебаний Терских предлагает метод набегающих моментов, по сути являющийся квазистатическим расчетом, в котором не учитываются упругие свойства вала. Этот подход дает заниженные результаты, вполне приемлемые для практики.

Что касается учета имеющихся в конструкции валопровода нелинейностей, то расчеты нелинейных колебаний проводились в основном для упрощенных систем с одной степенью свободы, что для быстроходных двигателей было неприемлемо, ввиду того, что узел колебаний образовывался на коленчатом валу. Н. М. Крылова и Н. Н. Боголюбов разработали новый эффективный способ построения резонансных кривых для многомассовых крутильных систем на основе асимптотических методов нелинейной динамики. Проведенные ими в годы Великой Отечественной войны расчеты нелинейных крутильных колебаний авиамоторов имели большое значение, а сам метод получил широкое распространение в НИИ и заводских КБ.

В 1960-е гг. в практику расчетов стало входить применение ЭВМ. Однако возможности машин были еще очень ограничены, поэтому длительное время определение собственных частот и форм колебаний проводилось с помощью различных методов, разработанных в прошлые годы. Дальнейшее развитие вычислительной техники позволило решить полную проблему собственных значений и собственных векторов с помощью итерационных методов, что, хотя и не сразу, позволило отказаться от всех частных методов расчета. Так в 1952 г. нашел, наконец, применение метод вращений Якоби. Однако его достаточно высокая трудоемкость заставила математиков искать новые алгоритмы.

Большой вклад в развитие методов расчетов крутильных колебаний внесла группа ученых Харьковского политехнического института, возглавляемая профессором Л. И. Штейнвольфом. В 1960-е гг. этот коллектив занимался динамическими расчетами колебаний тепловозных силовых установок. Среди них основные магистральные тепловозы Советского Союза – ТЭЗ с дизелем 2Д100 и различные модификации ТЭ10, оснащенные дизелем 10Д100. В результате комплекса мероприятий, куда входили и расчеты крутильных колебаний, за период с 1964 по октябрь 1968 гг. была решена важнейшая народно-хозяйственная задача - срок службы дизелей типа Д100 повышен на 100% и достиг 20 тысяч часов работы до капитального ремонта.

Накопленный опыт был применен при расчетах колебаний трансмиссий и приводов вспомогательных механизмов танковых силовых установок, выполненных в 1970-е гг. В

них нашли широкое развитие методы расчетов нелинейных крутильных колебаний, в том числе алгоритмы и программы, основанные на применении интегральных уравнений и итерационного метода Ньютона-Канторовича. Затем этот подход был развит для решения задач оптимизации и синтеза по динамическим характеристикам и исследования переходных режимов в силовых передачах транспортных машин.

Исследование крутильных колебаний валопроводов, таким образом, имеет важное историческое значение, как для развития теории колебаний, так и для развития техники, особенно двигателестроения. Дальнейшее развитие вычислительной техники уже в 1980-х гг. сняло все ограничения по числу степеней свободы рассматриваемых дискретных моделей. Современное состояние теории колебаний и применяемых для их расчетов средств не требуют выделения расчетов крутильных колебаний в отдельный класс задач.