

Сайпиддинов Шукрулла Садридинович, Старший преподаватель,
Наманганский инженерно-технологический институт

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИИ СООСНОГО ВАЛОПРОВОДА

Аннотация: в настоящее время отсутствует научное обоснование геометрических параметров валов джидной пилы и норм точности функциональных параметров. Вопрос оптимизации геометрических параметров пилы является важным и в этой связи требует безотлагательного разрешения. В статье рассматриваются вопросы связанные с изменением силы действующих рабочих поверхностей зубьев джидной пилы в зависимости от конструкции.

Ключевые слова: рабочая поверхность, вал, устойчивость, прочность, улучшение, вибрация, качественные показатели, свободное колебание, вынужденные колебание, изгибающие деформация, частоты колебание.

В настоящее время в технической литературе расчеты вибрации конструкций с многокаскадной и многоканальной амортизацией, к которым, в частности, относится соосный валопровод, выполняются с помощью метода конечных элементов (МКЭ) [1], дорогостоящих программных комплексов и вычислительной техники высокого уровня. Однако даже эти средства в настоящее время не позволяют учесть такие специфические факторы, как вращение гребных винтов.

Цель, которую ставили перед собою авторы – создание достаточно простой и физически понятной модели для расчета параметров вибрации соосного валопровода, а также соответствующих алгоритма и программы расчета, вычисления по которой могут быть выполнены достаточно быстро на персональных компьютерах пользователей.

В качестве основы динамической модели задачи была принята конструкция из [2], представляющая собой совокупность из двух квазиодномерных моделей, первая из которых опирается в нескольких точках через упругие опоры на неподвижное основание, а вторая квазиодномерная модель опирается на первую в нескольких точках, где установлены промежуточные опоры. При этом каждая из моделей в виде пространственно-криволинейной упругой конструкции (далее ПКУК) и ее дискретного варианта – пространственно-криволинейной упругой дискретной системы (далее ПКУДС), представляла собой последовательность базовых элементов (рис. 1).

Для учета возможной пространственной ориентации ПКУДС используются три последовательных поворота осей местной системы координат присоединяемого элемента.

Каждая рассчитываемая конструкция может иметь любое количество отдельных сосредоточенных или амортизированных масс, лежать на упругом основании, опираться на любое количество упругих опор или быть безопорной, нести сосредоточенную и распределенную нагрузку, учитывать особенности профиля поперечного сечения, внешнее и внутреннее демпфирование, учитывать влияние статической нагрузки на колебания, иметь кинематическое возбуждение [3, 4].

Материал модели предполагается линейно-упругим, но с введением в него неупругих сопротивлений комплексностью инерционно-жесткостных характеристик [5]; при этом внутренние сопротивления, пропорциональные деформациям и (или) их скоростям (т.е. относительным параметрам) корректируют жесткости в шарнире деформаций (т.е. вызывают появление у их величин мнимой части), а внешние сопротивления (пропорциональные



абсолютным скоростям) – корректируют соответствующие инерционные характеристики (т.е. вызывают появление у их величин мнимой части). Ввиду малости деформаций и перемещений при вибрации задача решается в геометрически линейной постановке.

В качестве основной кинематической гипотезы, позволяющей свести задачу теории упругости к задаче строительной механики, принята гипотеза плоских сечений с поправкой на сдвиг.

Рассмотрим круглый вал, вращающийся с угловой скоростью посередине вала насажен эксцентрично диск (рис.1). Обозначим через e эксцентриситет диска расстояние от его центра масс до недеформированной оси вала. Массой вала по сравнению с массой диска m будем пренебрегать. При вращении на вал со стороны диска действует сила инерции J (центробежная сила), под действием которой вал приобретает поперечную деформацию (рис.2). Пусть r – поперечная деформация вала в месте насадки диска.

Коэффициент жёсткости s вала определяется в ходе решения следующей задачи сопротивления материалов: имеем балку длиной l , к середине балки приложена сила F . Найти прогиб балки в точке приложения этой силы.

Дифференциальное уравнение изогнутой балки вала имеет вид

$$E = Jy''''M$$

где E -модуль упругости; J -момент инерции сечения вала, равный

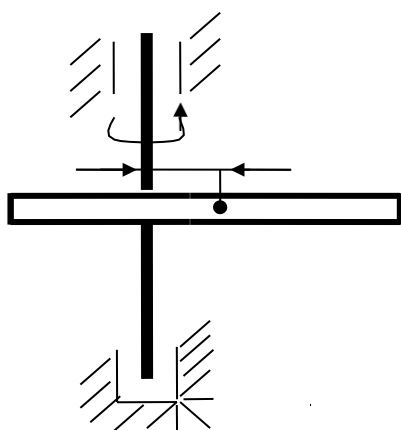


Рис.1

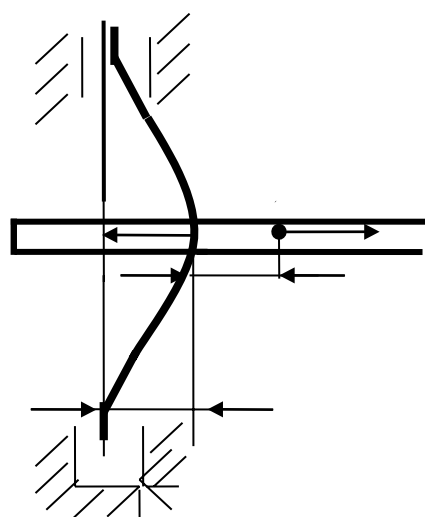


Рис.2

$J = \frac{\pi R^4}{4}$, если вал круглый. Изгибающий момент в сечении

$$M = R_A x = \frac{F}{2}x, \text{ значит, } y'''' = \frac{F}{2 E J}x.$$

Анализ параметров установившихся колебаний позволяет перейти к квазистатическому варианту модели. В этом случае модель так же представляет собой последовательность «базовых элементов», каждый из которых является совокупностью абсолютно твердых и безынерционных элементов, соединенных между собой и неподвижным основанием упругими связями, каждая из которых порождает усилия определенной структуры (пропорциональные смещению, скорости, ускорению).



При этом, как уже говорилось, характеристики жесткости могут быть комплексными величинами. В частном случае, когда частота колебаний равна нулю, имеет место статический расчет параметров деформирования квазиодномерной модели.

Для учета такого дополнительного фактора, как наличие статической сжимающей силы упора гребного винта была решена задача о ее влиянии на параметры вибрации [5, 6].

Действие этой силы на каждом базовом элементе приводило, во-первых, к возникновению дополнительного изгибающего момента, пропорционального абсолютному значению угла поворота элемента и, во-вторых, к возникновению дополнительного изгибающего момента, пропорционального деформации сдвига в обобщенном шарнире деформаций. В рамках учета воздействия первого момента был выполнен на этапе вывода формул для парциальных откликов (далее ПО) при проходе безынерционного стержня; учет воздействия второго – при проходе обобщенного шарнира деформаций.

Следует отметить, что с достижением статической критической сжимающей нагрузки происходит не только рост смещений, но происходит смена формы равновесия подобно тому, как это происходит при прохождении резонансной частоты (резонанс при нулевой частоте возбуждения). Обыкновенно принято сравнивать получаемые результаты с результатами «классических» решений..

Для учета такого дополнительного фактора, как вращение гребного винта с заданной угловой скоростью, был использован подход из [4]. Его суть – в модернизации инерционно-жесткостных характеристик квазиодномерной модели таким образом, чтобы в процессе ее установившихся колебаний индуцировалась дополнительная нагрузка, не учитываемая в рамках не модифицированной модели.

В нашем случае в процессе установившихся колебаний каждого из валов на него со стороны винта дополнительно действуют моменты гироскопической природы, обусловленные угловой скоростью переносного движения винта. Учет действия этих моментов привел к введению в точку расположения винта для модели валопровода дополнительного опорного комплекса из двух пружин мнимой жесткости, которые и индуцировали появление таких моментов в процессе вибрации каждого валопровода.

Для модифицированной таким образом квазиодномерной модели были разработаны алгоритм и программа «Винт» расчета параметров вибрации валопровода переменного поперечного сечения, опирающегося в заданных точках на упругие опоры и обладающего винтом, вращающимся с заданной угловой скоростью.

Результаты расчетов по разработанной программе показали хорошее совпадение с результатами для частных случаев, приведенными в литературе справочного характера.

На заключительном этапе построения модели задачи о вибрации соосного валопровода, каждый из валов которого оснащен винтом, вращающимся с заданной угловой скоростью, было необходимо выполнить сопряжение квазиодномерных моделей каждого из валов. При этом модель промежуточной опоры – GZ-шарнир деформаций, обладающий, в общем случае, линейными и (или) угловыми по-датливостями в трех ортогональных направлениях. Подобная реализация позволяет гибко и разнообразно строить соединения балок в единую конструкцию.

Алгоритм, реализованный в программе «Соосность», основан на вычислении динамических коэффициентов взаимовлияния от приложения единичных нагрузок в точках установки шарниров и последующего решения систем уравнений, отражающих совместность деформаций в точках установки шарниров. Поскольку число точек сопряжения квазиодномерных моделей валов сравнительно не велико, вычислительный процесс даже на персональных компьютерах пользователей выполняется достаточно быстро.

В качестве математического метода, принятого при разработке алгоритма расчета и программы вычислений параметров деформации квазистатического варианта одиночной



модели, был выбран метод парциальных откликов (МПО) [5] в его дискретном варианте; при этом параметры установившихся колебаний (внутренние усилия и смещения) вычисляются при рассмотрении совместности деформаций правой и левой парциальных систем в точке их сопряжения.

Выбранный подход позволил избежать традиционного решения краевой задачи, представляющего собой, на взгляд авторов, существенно более сложный и трудоемкий процесс. Выбор в качестве ПО смещений от единичных усилий соответствует причинно-следственным связям в задачах строительной механики, что гарантирует, при соответствующем построении алгоритма расчета, соответствие устойчивости результатов вычислений и устойчивости моделируемого процесса [6].

По разработанному алгоритму написана программа «Соосность». Программа позволяет рассчитывать параметры установившихся колебаний каждого из валов соосного валопровода с учетом вращения гребных винтов. Рассчитываемая конструкция включает две ПКУДС, соединенные между собой GZ-шарнирами, каждая из которых может иметь отдельно учитываемые сосредоточенные массы, в том числе амортизированные, обладать внешним и внутренним демпфированием, иметь как силовое, так и кинематическое возбуждение.

Программа имеет 3 панели настроек, а также дисплей 4, на котором представлена схема рассчитываемой конструкции и распределение вдоль оси выбранной ПКУДС амплитуд интересующих параметров вибрации: 1-я панель дает возможности редактировать балку, загрузить данные из файла, записать их в файл, что позволит легко вернуться к рассчитываемой конструкции; 2-я панель позволяет менять частоту возбуждения, изменить профиль сечения балки как в ручном режиме, так и выбрать нужный из встроенного справочника, создать новую конструкцию, запомнить; 3-я панель дает возможность вывода графиков распределения вдоль оси ПКУДС амплитуд интересующих параметров, таких как перемещения Z , углы поворота V , моменты M и силы N ориентированных по осям связанной системы координат элементов.

С целью создания более наглядного варианта применения программы «Соосность» была разработана программа «Демонстрация», в которой программа «Соосность» являлась подпрограммой, выполняющей расчеты. В программе «Демонстрация» было изначально задано количество внешних и внутренних опор (три внешние для наружного вала и одна внешняя и три внутренние опоры для внутреннего вала).

При старте программы появляется окно со схемой конструкции. В окне пять различных панелей настроек и дисплей под номером 6, на котором представлена схема рассчитываемой конструкции: 1-я панель дает возможность задать геометрические характеристики внешнего вала и нагрузку на внешний вал; 2-я панель предназначена для задания геометрических характеристик внутреннего вала и нагрузки на внутренний вал; 3-я панель позволяет выбрать ПКУДС, для которой следует строить графики распределения выбранных параметров;

4-я панель дает возможность менять частоту возбуждения, а также с возможностью перейти в расчетную программу «Соосность»; 5-ая предназначена для назначения параметров вибрации, графики распределения амплитуд которых следует вывести на экран.

Приведенная программа «Демонстрация» показывает, как пользователь может, используя программу «Соосность» как подпрограмму, сравнительно легко создавать программы с более удобным интерфейсом, соответствующие его конкретной задаче.

Список литературы:

1. Куменко А.И., Злобин О.А., Кузнецов П.В., Кузнецов В.П. «Комплексная диагностика и наладка турбоагрегатов с использованием датчиков вала». «Проблемы вибрации, виброналадки, вибромониторинга и диагностики оборудования электрических станций». М. ВТИ. 14-16 декабря 2019;



2. Куменко А.И. Совершенствование расчетно-экспериментальных методов исследования динамических характеристик турбоагрегатов и их элементов. М.МЭИ.1999 г.
3. Куменко А.И. Глава 9. Системы виброконтроля, вибромониторинга и вибродиагностики. в книге Сперлина С.С. Механическая наладка паровых турбоагрегатов. Под ред. Куменко А.И.. Недра. Санкт-Петербург. 2006 г.
4. Куменко.А.И. Интегральный метод решения задач балансировки роторов и валопроводов энергетических турбоагрегатов, Журнал «Сборка в машиностроении и приборостроении» № 2, 2005 г.
5. Куменко А.И., Морозова Д.С., Карев А.В. Применение математического моделирования в задачах динамики системы "Турбоагрегат-фундамент-основание" //Вестник МЭИ. – N 1. – 2014. С. 65-73.
6. Sh. Imomkulov. «Investigation of bending vibrations of rotating shafts with distributed inertial characteristics. The Seybold Report journal; 31.05.2023 y. 2380-2389 p.

