

АНАЛИЗ УРАВНОВЕШЕННОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Синицын В.А.

В статье анализируются условия и критерии уравновешенности двигателей внутреннего сгорания различных компоновочных схем. Рассматриваются силы, действующие в ДВС и вызывающие его внутреннюю и внешнюю неуравновешенность. Приводятся мероприятия, способствующие снижению низкочастотных вибраций двигателя, связанных с неравномерностью крутящего момента.

На установившемся режиме работы в двигателе действуют периодически изменяющиеся по величине и направлению силы инерции поступательно движущихся масс (ПДМ), неуравновешенных вращающихся масс (НВМ), продольные моменты от этих сил, а также поперечный опрокидывающий реактивный момент, равный по величине, но обратный по знаку выходному крутящему моменту двигателя. В каждый момент времени все эти силы и моменты складываются и передаются на опоры двигателя.

Если на опоры двигателя не передается никаких сил и моментов, или передаются постоянные по величине и направлению силы и моменты, то двигатель считается полностью уравновешенным.

Это так называемая внешняя уравновешенность. Практически полной внешней уравновешенности работающего двигателя достичь невозможно, т.к. вследствие цикличес-

можно уменьшить за счет мероприятий, направленных на повышение равномерности выходного крутящего момента: перехода на 2-тактный цикл, увеличения числа цилиндров, увеличения массы маховика, соблюдения равенства интервалов между вспышками по двигателю и т. д.

Коротко рассмотрим мероприятия способствующие снижению низкочастотных вибраций двигателя, связанных с неравномерностью выходного крутящего момента.

1) Изменение диаграммы рабочего процесса.

Существенное влияние на амплитуды гармоник крутящего момента оказывает характер индикаторной диаграммы. Более плавное протекание рабочего процесса (применение двухфазного впрыска, полуразделенных камер сгорания) позволяет снизить вибрации, связанные с неравномерностью крутящего момента, на 3 – 5 дБ.

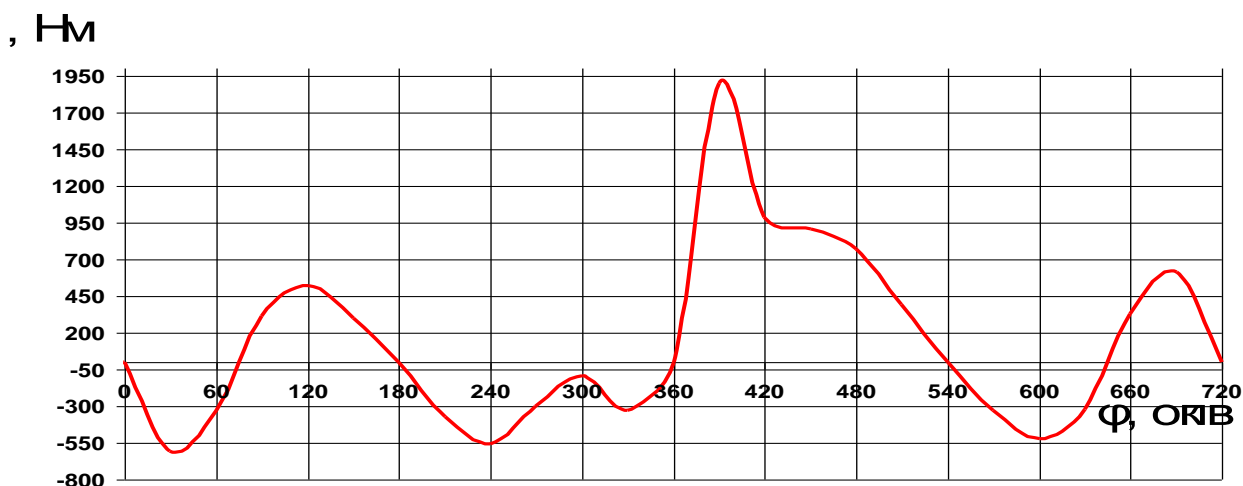


Рисунок 1 – Крутящий момент одноцилиндрового ДВС

ности рабочего процесса выходной крутящий момент и соответствующий ему реактивный момент всегда периодически изменяются в течение рабочего цикла (рис. 1). Остаточную внешнюю неуравновешенность двигателя

ПОЛЗУНОВСКИЙ АЛЬМАНАХ №4 2009

2) Применение коленчатых валов со смещенными в пределах одной секции шатунными шейками

Результирующие силы инерции и продольные моменты от этих сил вследствие

цикличности работы двигателя также не могут быть постоянными во времени. Следовательно, для полной динамической уравновешенности двигателя необходимо, чтобы эти силы и моменты были равны нулю. Тогда, без учета остаточной неуравновешенности двигателя вследствие изменения крутящего момента, основные условия полной внешней динамической уравновешенности можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Sigma P_R = 0; \quad \Sigma M_R = 0; \\ \Sigma P_I = 0; \quad \Sigma M_I = 0; \\ \Sigma P_{II} = 0; \quad \Sigma M_{II} = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

В зависимости от типа двигателя, его назначения и требований технического задания на проектирование двигатель может быть полностью уравновешен по всем шести признакам или частично, по некоторым из них. Если все или некоторые из признаков (1) выполняются без введения дополнительных мер по уравновешиванию, то говорят, что двигатель полностью или частично самоуравновешен. Уравновешивание двигателя по каждому из шести признаков осуществляется искусственными способами с помощью различных уравновешивающих механизмов. Для построения одних уравновешивающих механизмов можно использовать коленчатый вал или кулачковый вал механизма газораспределения, не усложняя существенно конструкцию двигателя; для построения других требуется введение дополнительных устройств, усложняющих конструкцию двигателя.

Основное влияние на степень динамической самоуравновешенности двигателя оказывают: число цилиндров в блоке, число и расположение блоков (схема компоновки), схема расположения кривошипов коленчатого вала (схема заклинки) и взаимное сочетание этих факторов. При определении принципиальной схемы двигателя необходимо использовать такое сочетание этих факторов, которое обеспечивало бы: максимальную равномерность выходного крутящего момента, оптимальное, с точки зрения нагрузки коренных подшипников, разнесение вспышек по двигателю, полную динамическую самоуравновешенность или остаточную несамоуравновешенность по тем признакам, которые можно легко уравновесить наиболее простыми конструктивными способами.

Но может случиться так, что благоприятная по самоуравновешенности схема компоновки не отвечает другим, более вашим тре-

бованиям, например, по плотности компоновки, по жестким весогабаритным ограничениям и др. В таких случаях выбирается схема компоновки, обеспечивающая первоочередные, главные требования, а для уравновешивания двигателя применяют специальные уравновешивающие механизмы, даже если они усложняют конструкцию. Задача уравновешивания неуравновешенных сил инерции заключается в искусственном создании уравновешивающей силы, которая должна иметь общую с неуравновешенной силой линию действия, должна быть равна ей по величине и направлена в противоположную сторону.

Наиболее просто уравновешиваются центробежные силы инерции - установкой противовесов на щеках колончатого вала, при этом коренные подшипники разгружаются от действия этих сил. Для уравновешивания сил инерции ПДМ первого порядка в общем случае требуется специальный двухвальный уравновешивающий механизм, в котором валы расположены параллельно продольной оси коленчатого вала, вращаются с одинаковой угловой скоростью ω в противоположных направлениях. В аналогичном уравновешивающем механизме сил инерции ПДМ второго порядка валы должны вращаться с удвоенной угловой скоростью. При уравновешивании продольных моментов от сил инерции необходимо искусственно создать уравновешивающий момент, равный уравновешиваемому по величине, противоположно направленный и действующий в той же плоскости.

Продольный момент от центробежных сил также уравновешивается наиболее просто - выносными противовесами на концах коленчатого вала, или созданием дисбаланса в массивных деталях на его концах, для уравновешивания продольных моментов от сил инерции ПДМ требуются специальные уравновешивающие механизмы первого и второго порядков. Различные практические способы уравновешивания будут рассмотрены дальше на конкретных примерах.

В настоящее время применение вычислительной техники позволяет аналитически решать любые задачи уравновешенности с учётом большого числа факторов. Но для того, чтобы свободно обращаться с ЭВМ и тем более чтобы создавать новое программно-математическое обеспечение задач уравновешенности, необходимы глубокие знания и практические навыки анализа в рассматриваемой области. Эти необходимые качества инженера-конструктора позволяет приобрести векторный графоаналитический метод

АНАЛИЗ УРАВНОВЕШЕННОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

анализа, обладающий достаточной простотой и большой наглядностью.

Векторный метод анализа уравновешенности основан на понятии динамически эквивалентной модели двигателя (ДЭМ), которая строится из соответствующих моделей продольных и поперечных модулей, составляющих двигатель. При построении динамически эквивалентных моделей принимаются следующие упрощающие допущения:

- все кривошипно-шатунные механизмы центральные, с одинаковыми значениями R и L ;

- поступательно движущиеся и вращающиеся массы всех кривошипно-шатунных механизмов одинаковы (на практике это условие достигается специальной подгонкой по массе всех поршневых и шатунных комплектов к балансировкой коленчатого вала);

- оси всех цилиндров плоского отсека лежат в одной, проходящей через центр шатунной шейки перпендикулярно продольной оси коленчатого вала;

- расстояние между осями соседних цилиндров в блоке и между центрами соседних коренных шеек одинаковы и равны постоянному шагу l_0 ;

- влиянием зазоров в подвижных соединениях КШМ и деформацией деталей КШМ и корпуса двигателя пренебрегаем.

В общем случае многоблочный многовальный двигатель рассматривается как сложная композиция, состоящая из совершенно одинаковых модульных двигателей. Продольные модули образуются продольным разбиением исходного двигателя на одинаковые одноблочные одновальные двигатели, число которых равно числу блоков исходного двигателя, иногда используют более сложные модули, число которых равно числу коленчатых валов исходного двигателя. Поперечные модули образуются поперечным разбиением исходного двигателя на одинаковые плоские отсеки, число которых равно числу цилиндров в блоке (или числу шатунных шеек коленчатого вала).

В первую очередь выполняется анализ уравновешенности по всем признакам одноблочного двигателя. Если окажется, что одноблочный двигатель самоуравновешен по некоторым признакам, то делается вывод о самоуравновешенности по этим же признакам и исходного многоблочного двигателя. Затем выполняется анализ по оставшимся неуравновешенным признакам плоского отсека и исходного двигателя, который рассматривается как сочетание плоских отсеков. По

результатам анализа разрабатываются наиболее простые способы уравновешивания или принимается решение оставить двигатель неуравновешенным, предусмотрев соответствующие меры для погашения вибраций.

Использование накопленных данных об уравновешенности одноблочных двигателей разной тактности, с разным числом цилиндров и с разными схемами коленчатого вала, а также различных плоских отсеков, позволяет значительно упростить решение задач уравновешенности двигателей с любыми компоновочными схемами, поместив эти данные в компьютерную память, можно автоматизировать поиск оптимальных решений.

При анализе уравновешенности двигателей обычно рассматривается два типа задач - прямая и обратная.

Прямая задача (анализ). Заданы схема компоновки двигателя и схема коленчатого вала. Требуется выполнить анализ уравновешенности и разработать наиболее простые способы уравновешивания.

Обратная задача (синтез). Заданы требуемые динамические свойства двигателя, т.е. полная или частичная самоуравновешенность. Требуется определить схему компоновки и схему коленчатого вала, обеспечивающие заданную степень самоуравновешенности. При неоднозначности решения необходимо найти оптимальный вариант, проведя сравнительный анализ всех возможных вариантов по всей совокупности определяющих факторов: плотности компоновки и габаритных ограничений, общей технологичности двигателя и технологичности коленчатого вала, равномерности выходного крутящего момента, степени нагружения коренных подшипников коленчатого вала, возможности объединения выпуска групп цилиндров при импульсном наддуве.

В практике конструирования могут встретиться различные варианты постановки прямой и обратной задачи уравновешенности, а также различные комбинации этих задач. Решение задачи векторным методом в любой её постановке основывается на рассмотрении динамически эквивалентных моделей одноблочных двигателей и плоских отсеков, из которых составляется динамически эквивалентная модель двигателя сложной компоновочной схемы.