

вариант и с целью сравнения выполнен расчет разъемной фланцевой конструкции нагреватель-крышка. Фланец рассчитывался по условию нераскрытия стыка, при этом учитывалось ослабление силы затяжки при разогреве от температуры окружающей среды до рабочей температуры. Основываясь на полученных результатах, подобраны размеры и материалы деталей узла. Так, при изготовлении корпусных конструкций из стали 15ХМ, целесообразно применять шпильки из стали 13Х12Н2В2МФ.

Исследовательские и проектные работы выявили остроту проблемы создания специальных методик для проектирования машин Стирлинга. К настоящему времени, в основном усилиями энтузиастов, по машинам Стирлинга накоплен достаточно большой объем научно-технической информации. Однако практически все публикации относятся к описаниям построенных изделий, в том числе большое количество работ об экспериментальных двигателях и игрушках, теоретическим исследованиям уровня квалификационных работ, а также к рекламным сообщениям. После успешного завершения испытаний двигателей Стирлинга на подводной лодки «SAGA I» в 1988 г., публикации специалистов с информацией инженерного уровня практически прекратились.

В связи с изложенным особую актуальность имеют работы в области создания методик учета конструкторско-технологических факторов на параметры и показатели рабочих процессов двигателя Стирлинга.

ВНЕШНЕЕ УРАВНОВЕШИВАНИЕ НЕСИММЕТРИЧНОГО РОМБИЧЕСКОГО МЕХАНИЗМА

Столяров А.С., Столяров С.П. (Санкт-Петербургский государственный морской технический университет)

Ромбический механизм применяется в машинах Стирлинга β -схемы благодаря компактности и тому, что обеспечивает разгрузку поршней от боковых усилий, что важно для работы направляющих сухого трения и уплотнений. Кроме того, машина Стирлинга с ромбическим механизмом может быть полностью уравновешена при помощи нащёчных противовесов, но только при соблюдении равенства длин шатунов, эксцентриситетов и масс поршней.

В данной работе рассматриваются способы уравновешивания сил инерции поступательно движущихся масс, но при этом двигатель может быть не уравновешен по крутящему моменту, что вызывает неравномерность вращения генератора и вращательную тряску двигателя. Эта проблема может быть решена устранением неравномерности вращения навешиванием на выходной вал массивного маховика, или с помощью электронной системы управления генератором, или распараллеливанием мощности на два генератора, вращающихся в противоположные стороны.

Изменяя отношение длин шатунов вытеснителя и рабочего поршня, есть возможность влиять на рабочий процесс машины Стирлинга. В качестве примера на рисунке 1 приведён график влияния отношения длин шатунов на эффективный КПД двигателя Стирлинга для работы на древесном топливе эффективной мощностью 2 кВт, разрабатываемого в настоящее время в СПбГМТУ.

Условие равенства масс поршней часто заставляет преднамеренно увеличивать массу рабочего поршня, так как масса вытеснителя обычно получается существенно выше по причине того, что он снабжается жаропрочным колпаком с тепловыми экранами.

В данной работе ставится задача определить условия внешней уравновешенности ромбического механизма по силам инерции поступательно движущихся масс при неравных массах поршня и вытеснителя и длинах их шатунов.

Схема приведения масс ромбического механизма показана на рисунке 2. Массы поршня и вытеснителя со штоком помещены в середины траверс, что эквивалентно с точки зрения динамики.

Шатун в данной схеме представлен двухмассовой моделью, так как она полностью эквивалентна реальной детали с точки зрения положения центра масс. То, что в этом случае не соблюдается равенство моментов инерции, в данной задаче не имеет значения.

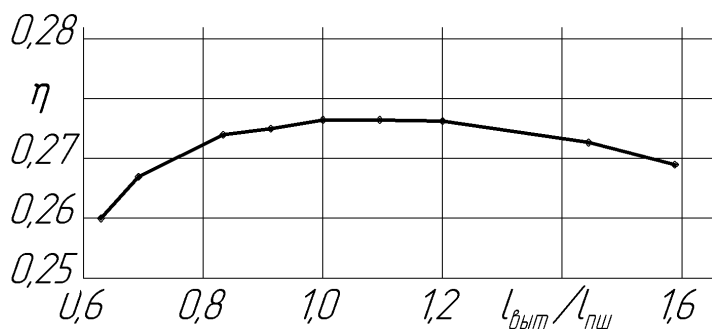


Рис. 1. Влияние отношения длин шатунов вытеснителя и рабочего поршня на эффективный КПД двигателя

Часть массы шатуна, приведённая к верхней головке, обозначена m_{us} , к нижней – m_{ur} . Поступательно движущаяся масса поршня и вытеснителя,

$$m_S = m_{nu} + 2m_{us},$$

где m_{us} - масса поршня.

Поступательно движущаяся масса вытеснителя

$$m_{S1} = m_{\text{выт}} + 2m_{u1s},$$

где m_{ur} - масса вытеснителя.

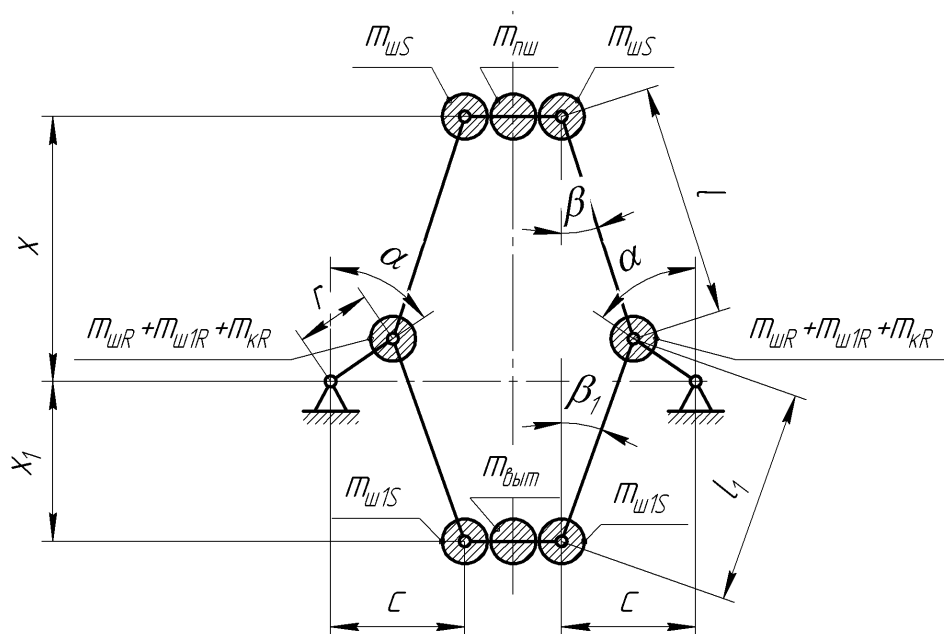


Рис. 2. Схема приведения масс ромбического механизма

Вращающаяся масса

$$m_R = m_{кр} + m_{ur} + m_{u1r},$$

где m_R – вращающаяся масса коленвала, приведённая к шатунной шейке.

В качестве критерия уравновешенности выберем перемещение центра масс. Из симметричности схемы следует, что в горизонтальном направлении механизм

полностью уравновешен. Рассмотрим перемещение центра масс в вертикальном направлении. Причём, далее будем учитывать только поступательно движущиеся массы, так как вращающиеся массы могут быть уравновешены нащёчными противовесами коленчатого вала.

Выведем зависимость для перемещения поступательно движущейся массы.

Угол отклонения шатуна от вертикали

$$b = \arcsin\left(\frac{c - r \sin(a)}{l}\right).$$

Координата поступательно движущейся массы, связанной с вытеснителем

$$x = r \cos(a) + l \cos(b) = r \cos(a) + l \sqrt{1 - \left(\frac{c - r \sin(a)}{l}\right)^2}.$$

Аналогично определяется координата массы, связанной с поршнем x_1 .

Положение центра масс системы определяется по формуле

$$x_C = \frac{x m_S - x_1 m_{S1}}{m_S + m_{S1}}.$$

Введём безразмерные параметры:

$$y = \frac{c}{r}, \quad k = \frac{c+r}{l}, \quad k_1 = \frac{c+r}{l_1}, \quad c = \frac{k}{k_1}, \quad m' = \frac{m_{S1}}{m_S}, \quad x'_C = \frac{x_C}{r}.$$

Тогда для относительного перемещения центра масс получаем

$$\begin{aligned} x'_C = \frac{1}{m'+1} (x - x_1 \bar{m}) = \frac{1-m'}{m'+1} \cos(a) + \frac{1}{m'+1} \sqrt{2y \sin(a) + \cos^2(a) - y^2} - 1 + \frac{1}{k^2} (y+1)^2 - \\ - \frac{m'}{m'+1} \sqrt{2y \sin(a) + \cos^2(a) - y^2} - 1 + \frac{c^2}{k^2} (y+1)^2. \end{aligned} \quad (1)$$

По выражению (1) строится закон перемещения центра масс системы. После этого с помощью разложения в ряд Фурье выделяется первый порядок $x'_{c1}(a)$ функции $x'_c(a)$, который может быть уравновешен нащёчными противовесами коленчатого вала

$$x'_{c1}(a) = a_0 + a \cos(a) + b \sin(a),$$

$$\text{где } a_0 = \frac{1}{2p} \int_0^{2p} x'_c(a) da, \quad a = \frac{1}{p} \int_0^{2p} x'_c(a) \cos(a) da, \quad b = \frac{1}{p} \int_0^{2p} x'_c(a) \sin(a) da.$$

Далее минимизируется остаточная неуравновешенность Δ_{x_C} , которая представляет собой максимальное отклонение центра масс от составляющей первого порядка движения

$$\Delta_{x_C} = \max(|x'_c(a) - x'_{c1}(a)|, a = 0..2p).$$

Минимизация и вычисления интегралов выполняются численно. Параметры минимизации выбираются в зависимости от условий, связанных с параметрами и конструкцией конкретного двигателя.

В качестве примера на рисунке 3 приведены сочетания безразмерных параметров механизма, которые обеспечивает наилучшее уравновешивание ромбического механизма при заданном отношении масс поршней $m'=1,5$. На рисунке 4 приведено значение остаточной неуравновешенности механизма.

Из рисунков видно, что остаточная неуравновешенность резко увеличивается при уменьшении длины шатуна и уменьшается при увеличении эксцентриситета. При этом при типичных параметрах ($\kappa=0,3$, $\psi=2$) механизм может быть уравновешен с точностью $\Delta_{x_C}=0,00005$ и более точно при соответствующем выборе параметров.

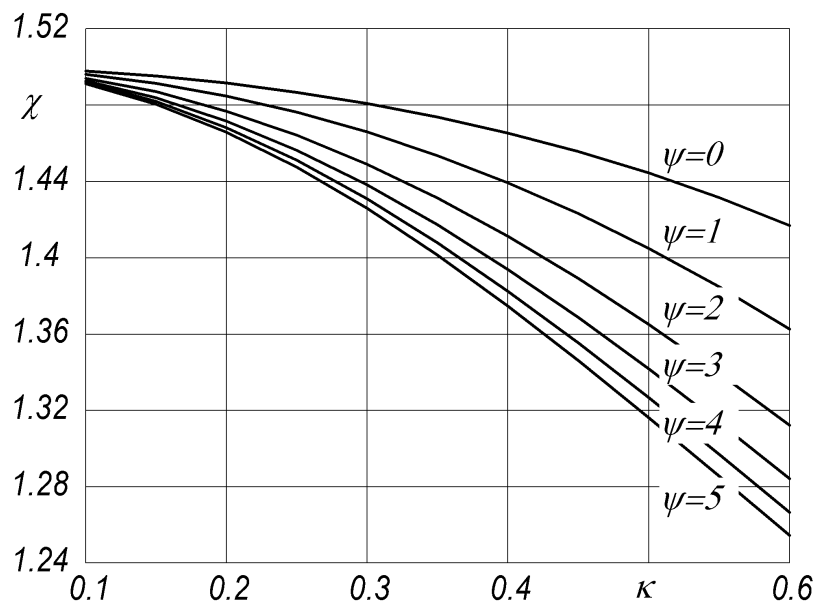


Рис. 3. Сочетания безразмерных параметров механизма, которые обеспечивает наилучшее уравновешивание при отношении масс поршней $m=1,5$: χ - отношение длин шатунов, ψ - относительный эксцентриситет, κ - параметр, близкий по смыслу к постоянной КШМ

Можно отметить, что очень близкие результаты дает минимизация составляющей второго порядка, что говорит о том, что составляющая второго порядка значительно превосходит составляющие более высоких порядков, и может быть полностью уравновешена.

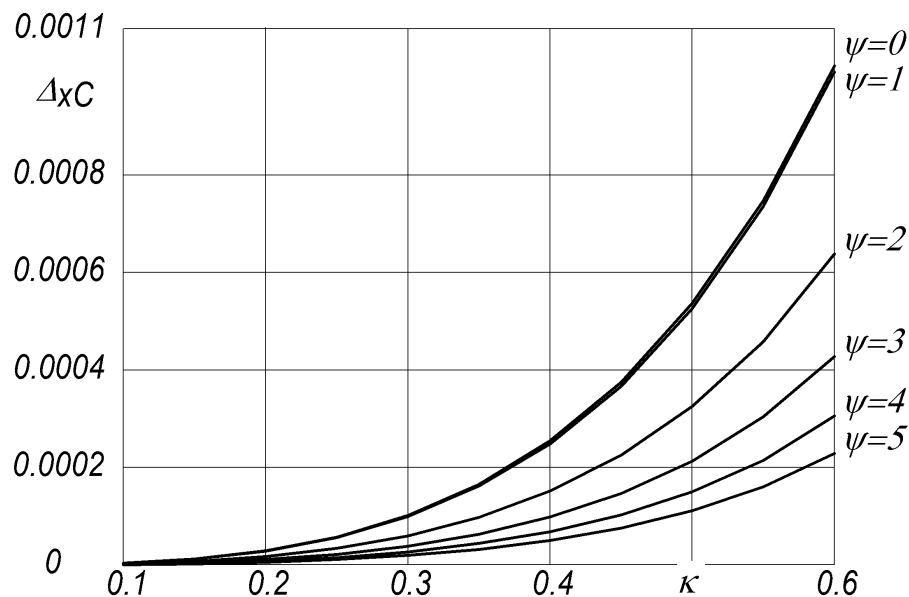


Рис. 4. Остаточная неуравновешенность механизма при тех же параметрах, что и на рисунке 3.

Выводы

За счёт подбора сочетания параметров может быть уравновешен ромбический механизм с различными длинами шатунов и массами деталей в группах поршня и вытеснителя. Это расширяет возможности для настройки рабочего процесса и позволяет уменьшить массу и габариты двигателя.

Приведён алгоритм определения остаточной неуравновешенности, которая является целевой функцией, минимизируемой при решении задачи уравновешивания.