

М.К. Луцкий

Уравновешивание авиационных двигателей

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 656
ББК 39.1
М11

М11 **М.К. Луцкий**
Уравновешивание авиационных двигателей / М.К. Луцкий – М.: Книга по Требованию, 2014. – 58 с.

ISBN 978-5-458-37529-0

Уравновешивание авиационных двигателей

ISBN 978-5-458-37529-0

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2014
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2014

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

ОТ АВТОРА

Настоящая брошюра составлена как пособие по соответствующему разделу курса „Кинематика и динамика авиационных двигателей“, читаемого в КАИ.

Последовательно рассмотрены и определены силы инерции кривошипно-шатунно-поршневых механизмов рядных (однорядных, V-образных) и звездообразных двигателей с центральными и прицепными шатунами. Указаны способы уравнивания неуравновешенных сил инерции в этих двигателях.

Брошюра не претендует на освещение вопросов уравниваемости всевозможных типов двигателей, но охватывает в конкретной и исчерпывающей форме вопросы уравниваемости наиболее распространенных типов авиадвигателей, а именно:

- 1, 2, 4, 6, 8-цилиндровых рядных,
- 2, 8, 12, 16-цилиндровых V-образных,
- 3, 5, 7, 9-цилиндровых звездообразных, и
- 10, 14, 18-цилиндровых сдвоенных звездообразных.

Однако, общая методика определения неуравновешенных сил инерции и их моментов вполне применима для исследования уравниваемости любого двигателя.

В брошюре нигде не принимались во внимание поправочные пары сил инерции шатунов, действующие в плоскостях движения шатунов, ввиду их малого практического значения.

Большая часть раздела — „Уравниваемость однорядных двигателей“ написана инженером Н. П. Резником, за что автор приносит ему благодарность.

Автор

15—X—36 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	стр.
I. Общие соображения об уравновешенности авиационных двигателей	5
II. Уравновешенность одиорядных двигателей	9
Одиоцилиндровый двигатель.	9
Двухцилиндровые двигатели.	11
Четырехцилиндровый двигатель .	14
Дополнительная теорема.	16
Шестицилиндровый двигатель .	19
Восьмицилиндровый двигатель	20
III. Уравновешенность V-образных двигателей	22
Двухцилиндровые V-образные двигатели	22
Восьмицилиндровый V-образный двигатель с углом развала $\gamma = 90^\circ$	28
Двенадцатицилиндровый V-образный двигатель с углом развала $\gamma = 60^\circ$	30
Шестнадцатицилиндровый V-образный двигатель с углом развала $\gamma = 45^\circ$	31
IV. Уравновешенность звездообразных двигателей .	33
Однорядная звезда с центральными шатунами	33
Однорядная звезда с прицепными шатунами ($\gamma = \gamma_e$) .	40
Двойная звезда	50

I. ОБЩИЕ СООБРАЖЕНИЯ ОБ УРАВНОВЕШЕННОСТИ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

На раму двигателя при его работе передаются усилия, которые слагаются из:

1. Веса двигателя;
2. Реакций отходящих газов;
3. Пары сил от момента внешнего сопротивления вращению винта;
4. Центробежных сил инерции вращающихся масс двигателя;
5. Сил инерции поступательно движущихся масс;
6. Моментов M_L от сил инерции шатунов.

Двигатель будет уравновешенным если, при установившемся режиме работы, его опоры (рама, фундамент) испытывают некоторые постоянные по величине и направлению усилия. В противном случае моторная установка будет подвержена вибрациям.

Поэтому на уравновешенность двигателя оказывают влияние только переменные силы, а силы постоянные, с точки зрения уравновешенности, значения не имеют.

Исходя из этого, для достижения уравновешенности двигателя, необходимо из сил переменных по величине или по направлению создать такую комбинацию, которая привела бы к получению равнодействующих сил и моментов постоянных по величине и направлению, или, в частном случае, равных нулю.

Возвращаясь к перечисленным выше силам, мы видим, что неуравновешенность двигателя могут вызвать только:

1. Реакции выхлопных газов;
2. Момент внешнего сопротивления вращению винта;
3. Силы инерции движущихся масс двигателя.

Реакция выхлопных газов в авиационных двигателях является величиной незначительной — поэтому ее во внимание не принимают.

Момент внешнего сопротивления вращению винта, даже при установившемся режиме работы, является величиной переменной, поэтому этот момент оказывает некоторое влияние на уравновешенность мотора и может быть уравновешен лишь путем постановки 2-х равных противоположно-вращающихся винтов.

Из сил инерции движущихся деталей двигателя, на уравновешенность последнего практически оказывают влияние только силы инерции кривошипно-шатунно-поршневого механизма.

Эти силы прямо пропорциональны квадратам чисел оборотов коленчатого вала и достигают значительных величин.

Центробежная сила, вызываемая эксцентрично расположенными вращающимися массами коленчатого вала, являясь для постоянного числа оборотов величиной постоянной, периодически меняет свое направление. Сила инерции поступательно движущихся масс, действующая

вдоль оси цилиндра, периодически меняет свою величину.

Моменты P_L сил инерции шатунов, ввиду их малой величины, существенного влияния на уравновешенность не оказывают и в дальнейшем не рассматриваются.

Суммируя все вышеизложенное, мы приходим к заключению, что задача уравновешивания авиационного двигателя сводится к задаче уравновешивания сил инерции поступательно и вращательно движущихся масс двигателя и их моментов.

Силу инерции любой массы M (фиг. 1), равномерно вращающейся с постоянной угловой скоростью ω около оси OZ , можно всегда уравновесить силами инерции одной или нескольких масс, равномерно вращающихся около той же оси OZ , с той же угловой скоростью ω .

Допустим, что мы хотим уравновесить вращающуюся массу M двумя массами M_1 и M_2 , лежащими в плоскости YZ .

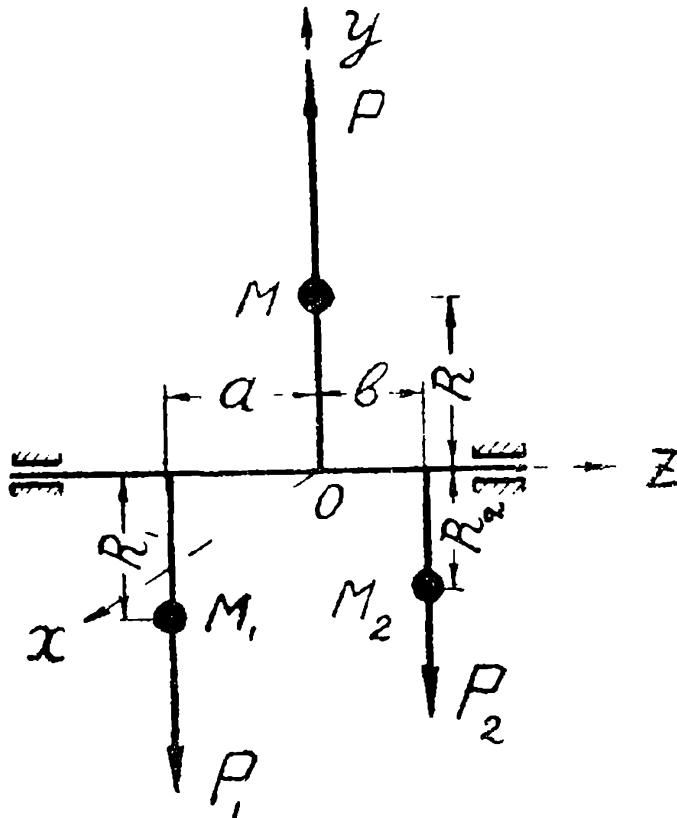
Если R , R_1 и R_2 обозначают соответственно расстояния центров тяжести масс M , M_1 и M_2 от оси вращения OZ , то центробежные силы инерции этих масс будут:

$$\begin{aligned} P &= MR\omega^2, \\ P_1 &= M_1R_1\omega^2, \\ P_2 &= M_2R_2\omega^2. \end{aligned}$$

Чтобы силы P_1 и P_2 уравновешивали силу P , необходимо соблюсти следующее условие:

$$\sum_y P = 0, \text{ т. е.}$$

$$MR\omega^2 - M_1R_1\omega^2 - M_2R_2\omega^2 = 0. \quad (a)$$



Фиг. 1.

Но при этом система из трех масс, будучи уравновешена статически ($\sum_y P = 0$), может оказаться динамически неуравновешенной, т. е. будет подвержена действию некоторой пары сил.

Для соблюдения динамической уравновешенности системы, необходимо удовлетворить второе условие:

$$\sum_x M_{ом} = 0, \text{ т. е.}$$

$$-M_1 R_1 \omega^2 a + M_2 R_2 \omega^2 b = 0. \quad (b)$$

Сократив уравнения (a) и (b) на ω^2 , получим:

$$\left. \begin{aligned} MR - M_1 R_1 - M_2 R_2 &= 0, \\ -M_1 R_1 a + M_2 R_2 b &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (c)$$

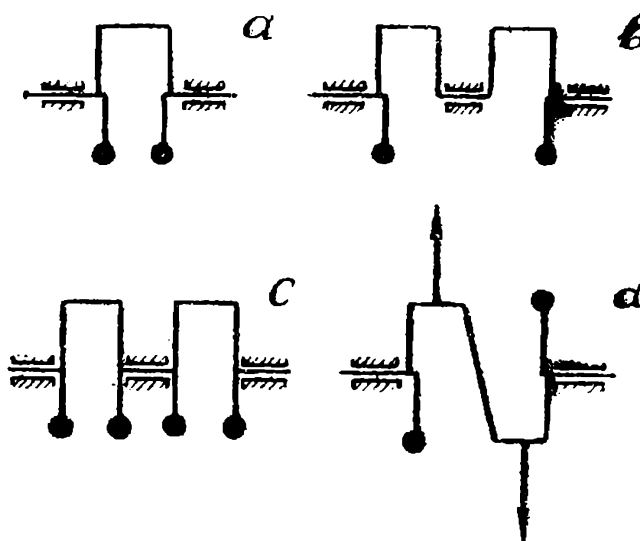
Выбор мест постановки противовесов для уравновешивания сил инерции массы M , конфигурация и величина масс M_1 и M_2 и положение их центров тяжести зависят в каждом отдельном случае от конструктивных возможностей и подбираются таким образом, чтобы была сохранена статическая и динамическая уравновешенность системы, т. е. удовлетворены уравнения (c).

Обычно с помощью противовесов уравновешиваются коленчатые валы, имеющие одно или два колена. Противовесы уравновешивают полностью центробежные силы, развиваемые эксцентрично расположенными массами колен вала и массами шатунов, отнесенными к цапфе кривошипа.

Фиг. 2 показывает схемы расположения противовесов у одноколенных и двухколенных валов разных типов. Причем вал d , показанный на фиг. 2, является статически уравновешенным и без противовесов, но при вращении такого вала возникает неуравновешенный момент, действующий в плоскости кривошипов вала. Этот момент можно уравновесить соответственным образом подобранными противовесами.

Коленчатые валы рядных многоцилиндровых двигателей стремятся строить так, чтобы они были динамически уравновешены без противовесов. Это возможно при условии, когда:

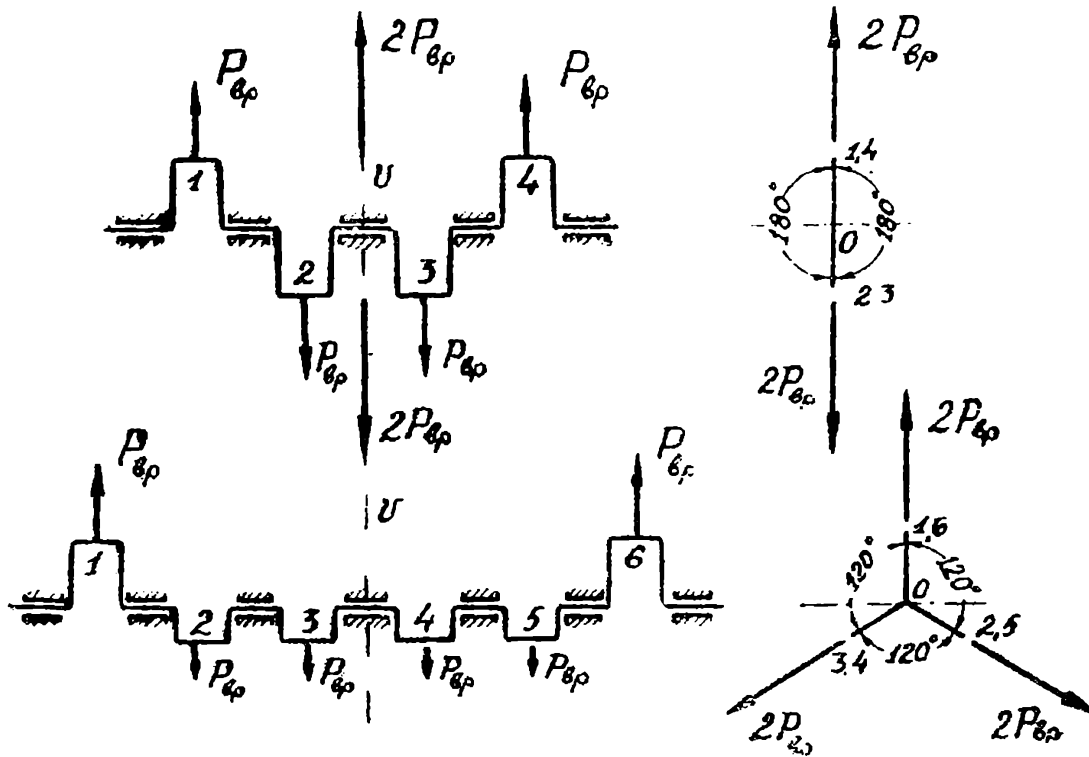
- а) число колен вала четное и не меньше 4-х;
- в) центр тяжести коленчатого вала находится на оси вращения;



Фиг. 2.

с) коленчатый вал симметричен в отношении плоскости V , проходящей через центр тяжести, перпендикулярно оси вращения вала (см. фиг. 3)¹⁾.

Для того, чтобы вспышки в рядном четырехтактном двигателе чередовались через равные промежутки времени, необходимо кривошипы разместить равномерно вокруг оси вала в каждой из симметричных его половин.



Фиг. 3.

Тогда угол между кривошипами будет:

$$\gamma = \frac{2\pi}{i} = \frac{4\pi}{2}$$

где i — число цилиндров в одном ряду.

Каждая пара колен, находящихся в одной плоскости, дает равнодействующую силу инерции в плоскости V . Так как центробежные силы, создаваемые массами каждого колена, равны между собою, то и равнодействующие R от сил инерции каждой пары колен тоже равны между собою, расположены в одной плоскости V , и повернуты одна относительно другой на угол $\frac{4\pi}{i}$. Общая равнодействующая центробежных сил инерции всегда будет равна нулю. Моменты этих сил тоже равны нулю.

¹⁾ Здесь имеется в виду только средняя часть вала, несущая кривошипы; концы же вала во внимание не принимаются, т. к. их силы инерции уравновешены.

Такое расположение кривошипов относительно плоскости V создает благоприятные условия и в отношении уравнивания сил инерции поступательно движущихся масс, так как эти силы от каждой пары симметрично расположенных цилиндров будут давать равнодействующую, параллельную осям цилиндров и лежащую в плоскости V , что представляет большие удобства для определения общей (от всех цилиндров) равнодействующей. Моменты этих сил будут всегда равны нулю.

Итак, коленчатые валы или полностью уравновешены сами собой, или легко уравниваются при помощи противовесов [см. уравнения (с)].

II. УРАВНОВЕШЕННОСТЬ ОДНОРЯДНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Одноцилиндровый двигатель

Сила инерции поступательно движущихся масс в общем виде выразится так:

$$P = M_n R \omega^2 (\cos \alpha + 4\rho_2 \cos 2\alpha - 16\rho_4 \cos 4\alpha + 36\rho_6 \cos 6\alpha - \dots).$$

При рассмотрении вопросов уравновешенности одноцилиндрового двигателя, обычно ограничиваются рассмотрением сил инерции первого и второго порядков. Силами инерции высших порядков, как величинами относительно малыми, пренебрегают.

Тогда силу инерции поступательно движущихся масс M_n одноцилиндрового двигателя можно принять равной:

$$P \cong M_n R \omega^2 \cos \alpha + \lambda M_n R \omega^2 \cos 2\alpha.$$

Величину $P_1 = M_n R \omega^2 \cos \alpha$ называют силой инерции 1-го порядка, $P_2 = \lambda M_n R \omega^2 \cos 2\alpha$ называют силой инерции 2-го порядка.

Направление силы P , приложенной к оси пальца поршня в точке A , принимаем за положительное, если она направлена от центра O коленчатого вала (фиг. 4).

Сила инерции 1-го порядка неуравновешена; ее максимальные значения будут при $\alpha = 0^\circ$ и $\alpha = 180^\circ$ и равны:

$$P_{1max} = M_n R \omega^2.$$

Сила инерции 2-го порядка также неуравновешена; ее максимальные значения будут при $\alpha = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ и 270° и равны:

$$P_{2max} = \lambda M_n R \omega^2.$$

Посмотрим, как можно уменьшить действие неуравновешенной силы инерции P_1 при помощи противовесов, надлежащим образом подобранных и расположенных на продолжении щеки кривошипа.

Пусть M_1 — масса противовесов, R_1 — расстояние их центров тяжести от оси O .

Центробежная сила инерции противовесов будет:

$$P_{пр} = M_1 R_1 \omega^2.$$

Вычитая из нее центробежную силу вращающихся масс, получим:

$$P'_{пр} = P_{пр} - P_{вр},$$

где:

$$P_{вр} = M_{вр} R \omega^2,$$

$M_{вр}$ — массы кривошипа и шатуна, отнесенные к оси цапфы кривошипа.

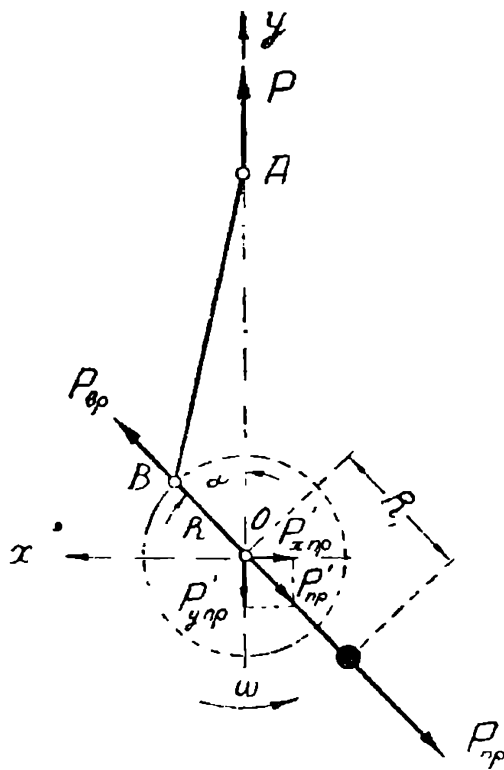
Переносим силу $P'_{пр}$ в точку O и разлагаем ее по направлениям координатных осей, получим:

$$P'_{упр} = -P'_{пр} \cos \alpha,$$

$$P'_{хпр} = -P'_{пр} \sin \alpha.$$

Вертикальная составляющая $P'_{упр}$ всегда направлена противоположно силе инерции P_1 .

Соответствующим подбором величин противовесов можно уменьшить и даже свести к нулю влияние на двигатель силы инерции первого порядка, но появляющаяся при этом горизонтальная составляющая сила $P'_{хпр}$ будет тем больше, чем больше с помощью



Фиг. 4.

противовесов будет уравниваться сила инерции 1-го порядка поступательно движущихся масс.

Максимальное уравнивание силы инерции 1-го порядка и неизбежное увеличение при этом горизонтальной составляющей $P'_{хпр}$, представляет некоторый интерес в автомобильных двигателях, так как горизонтальные колебания для автомобиля менее опасны.

Обычно удовлетворяются уравниванием половины силы инерции 1-го порядка.

Таким образом неуравновешенными остаются: часть (половина) силы инерции 1-го порядка

$$\frac{1}{2}P_1 = \frac{1}{2}M_n R\omega^2 \cos \alpha = \frac{1}{2}P_{1max} \cos \alpha;$$

составляющая центробежной силы инерции, действующей вдоль оси OX ,

$$P'_{хпр} = -P'_{np} \sin \alpha = -\frac{1}{2}P_{1max} \sin \alpha;$$

и сила инерции 2-го порядка

$$P_2 = \lambda M_n R\omega^2 \cos 2\alpha.$$

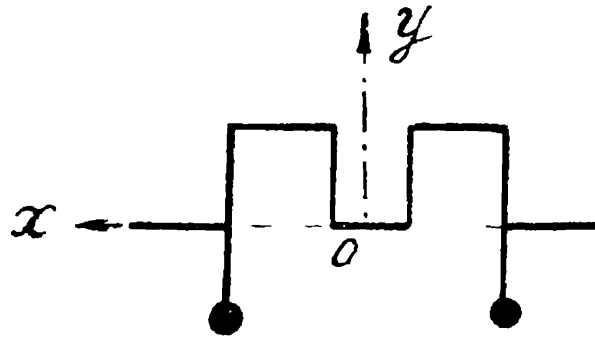
Геометрическая сумма сил $\frac{1}{2}P_1$ и $P'_{хпр}$ дает постоянный по величине вектор

$$R = \sqrt{\left(\frac{1}{2}P_1\right)^2 + (P'_{хпр})^2} = P'_{np} = \frac{1}{2}M_n R\omega^2,$$

вращающийся с угловой скоростью ω в сторону обратную вращению коленчатого вала и составляющий с радиусом кривошипа при $\alpha = 0^\circ$ угол, равный 0° .

Двухцилиндровые двигатели

1. На фиг. 5 схематически представлен коленчатый вал двухцилиндрового двигателя с расположением кривошипов под углом



Фиг. 5.

в 360° , что обеспечивает равномерное чередование вспышек при четырехтактном процессе.

Если принять, что поршни и шатуны имеют одинаковые веса, то, с точки зрения действия сил инерции, этот двигатель аналогичен одноцилиндровому двигателю (фиг. 4), у которого те же длина шатуна и ход поршня, но поршень и шатун имеют как-бы удвоенный вес.

Таким образом, в отношении уравновешенности, такой двигатель не отличается от одноцилиндрового. Все рассуждения,

относительно уравнивания одноцилиндрового двигателя целиком применимы и здесь.

2. Рассмотрим двухцилиндровый двигатель с расположением кривошипов под углом в 180° (фиг. 6).

При таком расположении кривошипов невозможно равномерное чередование вспышек в четырехтактном двигателе.

Вспышки будут чередоваться через 180° и 540° .

Сила инерции 1-го порядка для первого цилиндра будет:

$$P_1 = M_n R \omega^2 \cos \alpha.$$

Сила инерции 1-го порядка для второго цилиндра выразится аналогично, но необходимо изменить α через $(\alpha + 180^\circ)$, т.

$$P'_1 = M_n R \omega^2 \cos (\alpha + 180^\circ) = - \\ = -M_n R \omega^2 \cos \alpha.$$

Суммируя силы инерции первого порядка, мы приходим к заключению, что равнодействующая их равна нулю. Но, при этом получается пара сил, момент которой равен:

$$M_{\text{ом } 1} = a P_1 = a M_n R \omega^2 \cos \alpha,$$

где a — расстояние между осями цилиндров.

Момент пары сил зависит от расстояния a , поэтому для большей уравновешенности двигателя желательно возможно больше сблизить оси цилиндров.

Силы инерции 2-го порядка будут:

$$P_2 = \lambda M_n R \omega^2 \cos 2 \alpha,$$

$$P'_2 = \lambda M_n R \omega^2 \cos 2(\alpha + 180^\circ) = \lambda M_n R \omega^2 \cos 2 \alpha.$$

Следовательно, равнодействующая сил инерции 2-го порядка равна:

$$R_2 = 2 \lambda M_n R \omega^2 \cos 2 \alpha.$$

Эта сила направлена по оси OY и остается неуравновешенной

Таким образом двухцилиндровый двигатель, у которого кривошипы расположены под углом в 180° , недостаточно уравновешен, хотя силы инерции первого порядка и не дают равнодействующей. Возникающая пара сил будет стремиться раскачивать мотор вокруг оси OZ . Эту пару можно при помощи противовесов частично уравновесить, пользуясь методом, примененным для