

## Уравновешивание масс у машин внутреннего горения.

Широкое применение быстроходных машин внутреннего горения в различных отраслях техники: в теплоходостроении, в автомобильном деле, в авиации и проч. поставило вопрос об уравновешивании масс на первое место при разработке конструкций этих машин. Между тем в русской технической литературе до сих пор нет работы в достаточной мере исчерпывающей этот вопрос, что очень чувствуется всеми теми лицами, которым приходится иметь дело с проектированием машин внутреннего горения. Все существующие курсы машин внутреннего горения далеко недостаточно освещают этот вопрос, касаясь его только вскользь и при том иногда неправильно его освещая (Н. Güldner)\*). В работе своей под выше указанным заголовком автор восполняет существующий пробел в русской технической литературе, ограничиваясь рамками исследования существующих машин.

Впервые вопрос о влиянии движущихся масс на ход поршневых машин возник по отношению к паровым машинам, где он имеет такую же остроту, как и у быстроходных машин внутреннего горения. Там он был поставлен на очередь еще в 1849 г. Lechatelier, хотя полная теория колебательного движения паровоза в исправленном виде дана была Zeuner'ом в 1861 г. В 1893 г. немецкому инженеру Schlick'у после долгих опытов удалось получить уравновешенные паровые машины, не прибегая к устройству противовесов, но давая лишь определенные значения углам между кривошипами и расстояниям между механизмами и массами поступательно движущихся частей. Возникшие споры по поводу приоритета, который оспаривали у Schlick'a Taylor и Lagrow, были причиной дальнейших исследований вопроса со стороны Schubert'a в его „Theorie des Schlick'schen Massenausgleiches“ и со стороны Lorenz'a в работах: „Dynamik der Kurbelgetriebe“ и „Technische Mechanik starrer Systeme“, содействовавших разъяснению этого вопроса. Позже мы видим обстоятельные работы Sharp'a: „Balancing of engines steam, gas and petrol“, и Kölsch'a: „Gleichgang und Massenkräfte bei Fahr- und Flugzeugmaschinen“. Последняя работа, как показывает само название, относится исключительно к машинам внутреннего горения, при том узкоспециального назначения.

В марте 1912 г. В. П. Аршауловым в О-ве Технологов был зачитан доклад о теплоходе „Бородино“, развитием которого является статья того же автора, помещенная в 1913 г. в „Вестнике О-ва Технологов“ под заглавием: „Об уравновешивании сил инерции в двигателе Дизеля“. В этой статье В. П. Аршаулов дает решение вопроса об уравновешивании судовых машин внутреннего горения, осуществленное в некоторых машинах, построенных для теплоходов Коломенским заводом. Решение это, как можно видеть, совпадает в принципе с решением вопроса об уравновешивании судовых паровых машин, данное в свое время Schlick'ом, но отличается чрезвычайным изяществом и простотой. Через год в том же О-ве Технологов и на ту же тему прочел свой

\*) См. русск. перев. книги Н. Güldner'a, стр. 230—1916 г.

доклад проф. А. А. Радциг, отличающийся простотой и ясностью изложения. Проф. Радциг изложил вопрос примерно в том виде, как он изложен у проф. Lorenz'a, и обратил внимание собрания на значение поперечного момента, вызываемого поворотным ускорением и имеющего несомненно существенное влияние на плавность хода машин.

Статья В. П. Аршаулова и доклад проф. А. А. Радцига, напечатанные в Вест. О-ва Техн. в 1913 г. произвели глубокое впечатление на широкие круги техников.

В конце 1918 г. по постановлению Механ. Факультета мною была предложена, на соискание диплома первой степени инженеру А. В. Квасникову тема: „Уравновешивание масс у машин внутреннего горения по В. Аршаулову и О. Kölsch'у“. Представленная инж. Квасниковым работа оказалась интересной не только в смысле ответа на поставленный вопрос, но и со стороны попытки дать исходную формулу для нахождения свободных сил и моментов. Главной его заслугой несомненно является введение угла расположения цилиндров в уравнения свободных сил и моментов, данных Lorenz'ом, и хотя от этого общий вид уравнений усложняется, но решение частных случаев упрощается.

Производя исследование вопроса, об уравновешивании масс машин внутреннего горения, я пользовался исследованиями и данными Lorenz'a, Sharp'a, Kölsch'a, Аршаулова, Радцига и указанной формулой инж. Квасникова. Исследование сводилось главным образом к изучению отдельных случаев уравновешивания машин по принципу Шлика-Аршаулова и с помощью противовесов. Общие формулы свободных сил и моментов имеют слишком сложный вид, чтобы по ним можно было быстро и легко ориентироваться всякому желающему ознакомиться со свойствами машины. Для решения вопроса в частном случае приходится нередко прибегать к длинным вычислениям, что в условиях практики является неудобным, а потому мною дана сводка результатов работы, в виде отдельной таблицы решений частных случаев.

### Общий вид условий равновесия.

Во всех поршневых машинах действуют:

- 1) силы инерции возвратодвижущихся частей и
- 2) моменты, связанные общим ур-нем

$$\Sigma m_p + \Sigma m_j - \Sigma m_e = 0,$$

где  $\Sigma m_p$  сумма моментов сил действующих и сил сопротивления,  $\Sigma m_j$  сумма моментов всех сил инерции, как касающихся, так и вращающихся при постоянной угловой скорости и  $\Sigma m_e$  сумма моментов сил инерции, вызываемых дополнительным угловым ускорением  $\frac{d\omega}{dt}$ . Суммы

моментов  $\Sigma m_p$  и  $\Sigma m_e$  опрокидывают машину около оси вала, сумма моментов  $\Sigma m_j$  опрокидывает машину около оси, перпендикулярной к плоскости, проходящей через вал и оси цилиндров. Кроме того существует еще поперечный момент относительно оси, параллельной оси вала, вызываемый качающимися массами шатуна.

Исходя из движения кривошипного механизма, можно вывести для сил инерции многоцилиндровой машины с расположением цилиндров согласно черт. 5 следующие ур-ия.

$$\begin{aligned} X_0 = & -m r \omega^2 (\cos \psi_0 \Sigma \cos \varphi \cos \gamma - \sin \psi_0 \Sigma \sin \varphi \cos \gamma + \\ & + A_2 \cos 2 \psi_0 \Sigma \cos 2 \varphi \cos \gamma - A_2 \sin 2 \psi_0 \Sigma \sin 2 \varphi \cos \gamma \dots) - \\ & - m r E (\sin \psi_0 \Sigma \cos \varphi \cos \gamma + \cos \psi_0 \Sigma \sin \varphi \cos \gamma + \\ & + 1/2 A_2 \sin 2 \psi_0 \Sigma \cos 2 \varphi \cos \gamma - \frac{1}{2} A_2 \cos 2 \psi_0 \Sigma \sin 2 \varphi \cos \gamma \dots) \end{aligned}$$

$$Y_0 = -m r \omega^2 (\cos \psi_0 \Sigma \cos \varphi \sin \gamma - \sin \psi_0 \Sigma \sin \varphi \sin \gamma + \\ + A_2 \cos 2 \psi_0 \Sigma \cos 2 \varphi \sin \gamma - A_2 \sin 2 \psi_0 \Sigma \sin 2 \varphi \sin \gamma \dots) - \\ - m r E (\sin \psi_0 \Sigma \cos \varphi \sin \gamma + \cos \psi_0 \Sigma \sin \varphi \sin \gamma + \\ + \frac{1}{2} A_2 \sin 2 \psi_0 \Sigma \cos 2 \varphi \sin \gamma + \frac{1}{2} A_2 \cos 2 \psi_0 \Sigma \sin 2 \varphi \sin \gamma \dots)$$

Для вертикальных машин.

$$\gamma = 0, \varphi = \alpha \text{ и } Y_0 = \Sigma m \frac{d^2 y}{dt^2} = 0,$$

Следовательно, для уравнивания их необходимо выполнить условие.

$$\Sigma \cos \alpha = 0, \Sigma \sin \alpha = 0 \quad \Sigma \cos 2 \alpha = 0, \Sigma \sin 2 \alpha = 0$$

Уравнивание машин относительно продольных моментов.

Если, принять расстояния между осями цилиндров равным  $z$ , то относительно сил инерции возвратно-движущихся масс можно составить моменты.

$$M_x = \Sigma m z \frac{d^2 y}{dt^2} = -m r \omega^2 (\Sigma z \cos \psi \sin \gamma + A_2 \Sigma z \cos 2 \psi \sin \gamma + \dots + \\ + A_n \Sigma z \cos n \psi \sin \gamma + \dots) - m r E (\Sigma z \sin \psi \sin \gamma + \frac{1}{2} A_2 \Sigma z \sin 2 \psi \sin \gamma + \dots \\ + \frac{1}{n} A_n \Sigma z \sin n \psi \sin \gamma + \dots)$$

$$M_y = \Sigma m z \frac{d^2 x}{dt^2} = -m r \omega^2 (\Sigma z \cos \psi \cos \gamma + A_2 \Sigma z \cos 2 \psi \cos \gamma + \\ + A_n \Sigma z \cos n \psi \cos \gamma + \dots) - m r E (\Sigma z \sin \psi \cos \gamma + \\ + \frac{1}{2} A_2 \Sigma z \sin 2 \psi \cos \gamma + \dots + \frac{1}{n} A_n \Sigma z \sin n \psi \cos \gamma + \dots)$$

Следовательно, условия уравнивания будут

$$\Sigma z \cos i \psi \cos \gamma = 0, \Sigma z \cos i \psi \sin \gamma = 0, \\ \Sigma z \sin i \psi \cos \gamma = 0, \Sigma z \sin i \psi \sin \gamma = 0,$$

Не останавливаясь на выводе ур-ий поперечных моментов и результатах этих выводов, укажем лишь что один из них, вызываемый качающимися массами шатуна дает ур-ия в общем сходные с выше указанным и может быть уравновешен по способу Шлика-Аршаулов, второй момент, вызываемый поворотным ускорением, зависит главным образом от степени неравномерности машины.

При уравнивании сил и моментов с помощью противовесов уравнивание ведут не сполна, а на половину наибольшей величины этих сил и моментов, так как только при этом условии получается наилучшая уравновешенность. Исходя из этого положения, мною вычислены массы противовесов столбца IV таблицы результатов исследования; только в тех случаях, когда величина и направление силы инерции остается постоянной, мною вычислены противовесы для полного уравнивания.

Таблица результатов последования получена для различных типов машин после, подстановки значения постоянных углов  $\psi$ ,  $\alpha$  и  $\gamma$  в выше приведенные формулы. В таблице приняты следующие обозначения:  $m$  — масса,  $m_c$  — масса возвратно-движущихся частей,  $m_b$  — масса вращающихся частей,  $m_p$  — масса противовесов,  $r$  — радиус кривошипа,  $r_1$  — радиус центра тяжести противовесов,  $l$  — длина шатуна,  $a$  — расстояние по оси вала между точками приложения сил инерции,  $a_c$  — расстояние между силами инерции качающихся масс,  $a_p$  — расстояние между

центробежными силами вращающихся масс,  $A_2$  — расстояние между центробежными силами противовеса  $J_0$  — момент инерции шатуна, приведенный в центр качания. Численные коэффициенты выражений для моментов вычислены в предположении  $r:l = 1:5$ . Что касается коэффициентов  $A_2, A_4, \dots$  и  $C_1, C_2, C_3, \dots$ , то величины их могут быть взяты из следующей таблицы

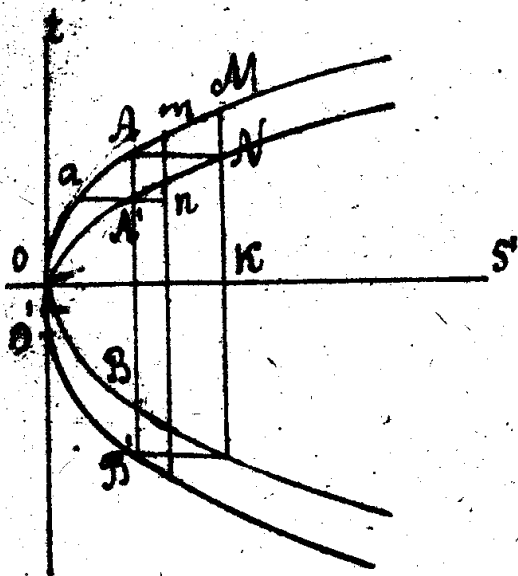
$\frac{r}{l}$	$1:3 \frac{1}{2}$	1:4	$1:4 \frac{1}{2}$	1:5
$A_2$	0,2918	0,2540	0,2250	0,2020
$A_4$	0,0062	0,0041	0,0028	0,0020
$A_6$	0,0001	0,0001	0,0000	0,0000
$C_1$	0,2887	0,2520	0,2236	0,2010
$C_2$	0,0091	0,0060	0,0042	0,0030
$C_3$	0,0002	0,0001	0,0001	0,0000

Подставляя те или иные значения величин в уравнения таблицы результатов, можно получить величины свободных сил и моментов а также величины противовесов для уравновешивания машин.

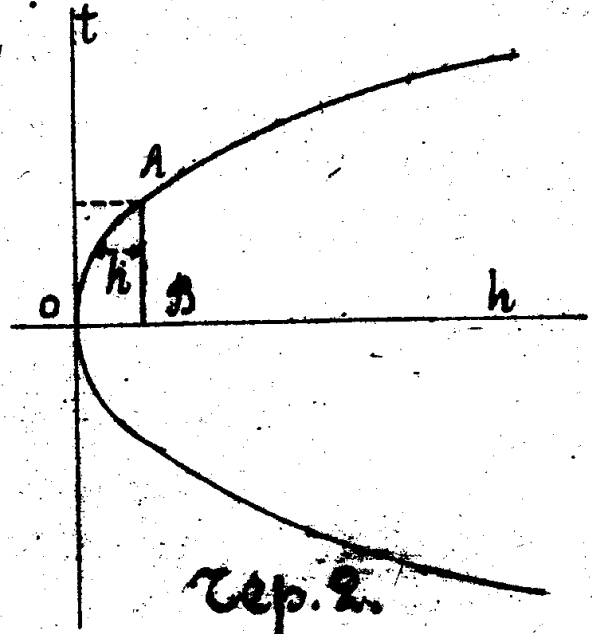
О величине свободных сил и моментов легче всего было бы судить по их порядку, но нельзя сравнивать свободные силы разных порядков, отличающихся не только по величине, но и по частоте действия. Кроме того, отсутствие свободной силы не служит еще признаком уравновешенности машины, так как возможны при этом значительные моменты, что мы видим, напр., у двухцилиндровых машин с диаметрально расположенными цилиндрами и кривошипами или у сдвоенных звездообразных машин. Сравнивая машины по величине порядка сил, нужно не забывать при этом о существовании свободных моментов, играющих более существенную роль, а также о возможности их полного или неполного уравновешивания противовесами. Так, напр., звездообразные машины имеют значительную свободную силу первого порядка, но вполне уравновешиваемую противовесами, что делает эти машины пригодными даже для аэропланов. То же самое можно сказать и о верообразных машинах, у которых почти полное уравновешивание достигается противовесами. Что касается вертикальных машин, то хорошо уравновешенными являются четырехцилиндровые машины с зеркальным расположением кривошипов, а также шести- и восьмицилиндровые машины. Все они не требуют противовесов, кроме двухтактных восьмицилиндровых машин. Если судить по величине порядка свободной силы, то наиболее уравновешенными машинами будут шестицилиндровые. Этим объясняется их все большее распространение в теплоходстве авиации и даже в автомобильном деле, где такое прочное положение завоевала себе четырехцилиндровая машина, обладающая достаточной для автомобиля уравновешенностью и большей дешевизной, чем шестицилиндровая машина. Вообще вертикальные, многоцилиндровые машины обладают лучшей уравновешенностью, чем все остальные типы машин. У них не только в большинстве случаев нет продольного момента, но и поперечного, вызываемого качающимися массами шатунов; свободные силы имеются только высших порядков. Причиной этого — симметричное расположение движущихся частей — по отношению к их общему центру тяжести, чего невозможно достигнуть в такой же мере в других конструкциях машин.

К статье В.Т. Карпенко.

Расчет распределительных органов  
двухтактных и четырехтактных машин.

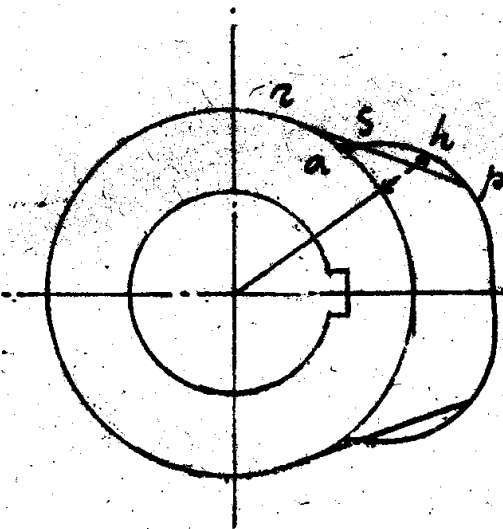


Чер. 1.

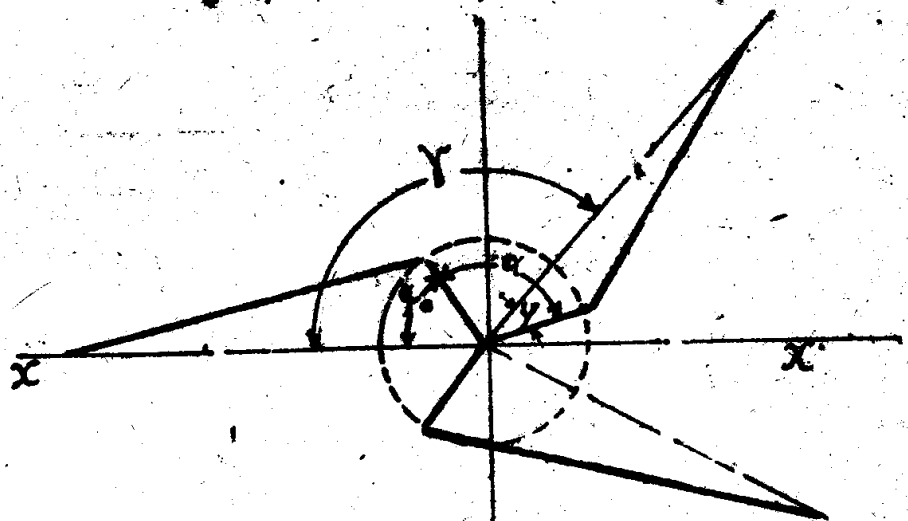


Чер. 2.

Уравновешивание масс у машин  
внутреннего горения.



Чер. 3.



Чер. 1.



# ТАБЛИЦА

результатов исследования.

И работе В. Е. Карпенко

№ по порядку	Тип машины.	Свободные силы.
1	Однocyлиндровая машина $\alpha = 0^\circ, \gamma = 0^\circ$	$X_{\max} = -m r \omega^2 \left(1 + \frac{r}{l}\right)$
2	Двухцилиндровая машина $\alpha = 180^\circ, \gamma = 0^\circ$	$X_{\max} = -m r \omega^2 2 A_2$
3	Двухцилиндровая машина $\alpha = 180^\circ, \gamma = 180^\circ$	Нет
4	Трехцилиндровая машина $\alpha = 120^\circ, \gamma = 0^\circ$	$X_{\max} = -m r \omega^2 3 A_2$
5	Трехцилиндровая веерообразная машина $\alpha = 0^\circ, \gamma_0 = 0^\circ, \gamma_1 = \gamma_2 = 60^\circ$	$X_0 = -m r \omega^2 (1,50 \cos \psi_0 + 0,50 \cos 2 \psi_0)$ $Y_0 = -m r \omega^2 (1,50 \sin \psi_0 + 1,50 \sin 2 \psi_0)$
6	Четырехцилиндровая машина с зеркальным расположением кривошипов, $\alpha = 180^\circ, \gamma = 0^\circ$	$X_{\max} = -m r \omega^2 4 A_2$
7	Четырехцилиндровая машина с разноплечным расположением кривошипов 1, 2, 3, 4, $\alpha = 90^\circ, \gamma = 0^\circ$	$X_{\max} = m r \omega^2 4 A_2$
8	Четырехцилиндровая машина с расположением кривошипов 1, 3, 2, 4, $\alpha = 90^\circ, \gamma = 0^\circ$	$X_{\max} = m r \omega^2 4 A_2$
9	V-образная четырехцилиндровая машина $\alpha = 0^\circ$ и $180^\circ, \gamma_1 = \gamma_2 = 45^\circ$	$X_0 = 0$ $Y_0 = -2 \sqrt{2} m r \omega^2 A_2 \sin 2 \psi_0$
10	Пятицилиндровая звездообразная машина $\alpha = 0^\circ, \gamma_0 = 0^\circ, \gamma_1 = 2^\circ, \gamma_2 = 144^\circ, \dots$	$X_0 = -2,5 m r \omega^2 \cos \psi_0$ $Y_0 = -2,5 m r \omega^2 \sin \psi_0$
11	Пятицилиндровая веерообразная машина $\alpha = 0^\circ$ и $180^\circ, \gamma_0 = 0^\circ, \gamma_1 = \gamma_5 = 72^\circ, \gamma_2 = \gamma_4 = 36^\circ$	$X_0 = -m r \omega^2 (-0,12 \cos \psi_0 + A_2 \cos 2 \psi_0)$ $Y_0 = -m r \omega^2 (1,12 \sin \psi_0 + 2,24 A_2 \sin 2 \psi_0)$
12	Шестицилиндровая четырехтактная машина с зерк. распол. крив. $\alpha = 120^\circ, \gamma = 0^\circ$	$X_{\max} = -m r \omega^2 6 A_2$
13	Шестицилиндровая двухтактная машина $\alpha = 60^\circ, \gamma = 0^\circ$	$X_{\max} = -m r \omega^2 6 A_2$
14	V-образная шестицилиндровая машина $\alpha = 0^\circ, 120^\circ, 240^\circ, \gamma_1 = \gamma_2 = 30^\circ$	$X_0 = 5,2 m r \omega^2 A_2 \cos \psi_0$ $Y_0 = 0$
15	Семицилиндровая звездообразная машина $\alpha = 0^\circ, \gamma_0 = 0^\circ, \gamma_1 = 51,43^\circ, \gamma_2 = 102,86^\circ, \dots$	$X_0 = -3,5 m r \omega^2 \cos \psi_0$ $Y_0 = -3,5 m r \omega^2 \sin \psi_0$
16	Семицилиндровая веерообразная машина $\alpha = 0^\circ, \gamma_0 = 0^\circ, \gamma_1 = \gamma_5 = 51,43^\circ, \dots$	$X_0 = -m r \omega^2 (0,06 \cos \psi_0 + 1,44 A_2 \cos 2 \psi_0)$ $Y_0 = -m r \omega^2 (1,06 \sin \psi_0 + 3,06 A_2 \sin 2 \psi_0)$
17	Восьмицилиндровая четырехтактная машина с зерк. распол. кривош. $\alpha = 90^\circ, \gamma = 0^\circ$	$X_{\max} = m r \omega^2 8 A_2$
18	Восьмицилиндровая двухтактная машина $\alpha = 45^\circ, \gamma = 0^\circ$	$X_{\max} = -m r \omega^2 8 A_2$
19	Восьмицилиндровая звездообразная машина со смещен. цилиндр. $\alpha = 0^\circ$ и $180^\circ, \gamma = 45^\circ, 90^\circ, \dots$	Нет
20	V-образная восьмицилиндровая машина $\alpha = 0^\circ$ и $180^\circ, \gamma_1 = \gamma_2 = 45^\circ$	$X_0 = 0$ $Y_0 = -4 \sqrt{2} m r \omega^2 A_2 \sin \psi_0$
21	Девятицилиндровая звездообразная машина $\alpha = 0^\circ, \gamma_0 = 0^\circ, \gamma_1 = 40^\circ, \gamma_2 = 80^\circ, \dots$	$X_0 = -4,5 m r \omega^2 A_2 \cos \psi_0$ $Y_0 = -4,5 m r \omega^2 \sin \psi_0$
22	Четырнадцатцилиндров. звездообразн. маш. $\alpha = 0^\circ$ и $180^\circ, \gamma_0 = 0^\circ, \gamma_1 = 51,43^\circ, \gamma_2 = 102,86^\circ, \dots$	Нет



Свободные продольные моменты.	Свободны поперечные моменты.	Масса противовесов.
Нет	$M_1 = - J_c \omega^2 C_1$	$m_g = \frac{r}{r_1} (0,6 m_k + m_g)$
$M_{max} = - a m r \omega^2$	Нет	$m_g = \frac{r}{r_1 a_g} (0,5 a_k m_k + a_b m_b)$
$M_{max} = - 1,39 a m r \omega^2$	$M_1 = 2 J_c \omega^2 C_1$	$m_g = \frac{r}{r_1 a_g} (0,6 a_k m_k + a_b m_b)$
$M_{max} = 1,55 a m r \omega^2$	$M_1 = 2 J_c \omega^2 C_2$	$m_g = \frac{r}{r_1 a_g} (3,56 a_k m_k + a_b m_b)$
Нет	$M_1 = 2 J_c \omega^2 C_1$	$m_g = \frac{r}{r_1} (1,5 m_k + m_g)$
Нет	Нет	Противовесы не нужны
$M_{max} = 0,91 a m r \omega^2$	Нет	$m_g = \frac{r}{r_1 a_g} (0,53 a_k m_k + a_b m_b)$
$M_{max} = 1,92 a m r \omega^2$	Нет	$m_g = \frac{r}{r_1 a_g} (0,8 a_k m_k + a_b m_b)$
$M_{max} = - a m r \omega^2$	Нет	$m_g = \frac{r}{r_1 a_g} (a_k m_k + a_b m_b)$
Нет	$M_1 = - 5 J_c \omega^2 C_2$	$m_g = \frac{r}{r_1} (2,5 m_k + m_b)$
$M_{max} = - a m r \omega^2$	$M_1 = - 2 J_c \omega^2 C_1$	$m_g = \frac{r}{r_1 a_g} (1,2 a_k m_k + a_b m_b)$
$M_{max} 2 \sqrt{8 a m r \omega^2 A_2}$	$M_1 = 6 J_c \omega^2 C_2$	Противовесы не нужны
$M_{max} = - 2,46 a m r \omega^2$	$M_1 = 6 J_c \omega^2 C_2$	Противовесы не нужны
Нет	Нет	$m_g = \frac{r}{r_1 a_g} (a_k m_k + a_b m_b)$
$M_x = - a m r \omega^2 (1,75 \cos \varphi_0 - 0,10 A_2 \cos 2 \varphi_0)$	$M_1 = 7 J_c \omega^2 C_2$	$m_g = \frac{r}{r_1} (3,5 m_k + m_b)$
$M_x = - a m r \omega^2 (1,82 \sin \varphi_0 - 0,21 A_2 \sin 2 \varphi_0)$	$M_1 = 7 J_c \omega^2 C_2$	$m_g = \frac{r}{r_1 a_g} (1,5 a_k m_k + a_b m_b)$
Нет	Нет	Противовесы не нужны
$M_{max} = 2,495 a m r \omega^2$	$M_1 = 8 J_c \omega^2 C_2$	$m_g = \frac{r}{r_1 a_g} (1,5 a_k m_k + a_b m_b)$
$M_x = - 2,5 a m r \omega^2 Z (\cos \varphi_0 - B_1 \sin \varphi_0)$	Нет	$m_g = \frac{r}{r_1 a_g} (2 a_k m_k + a_b m_b)$
$M_x = - 2,0 a m r \omega^2 Z (\sin \varphi_0 - B_1 \cos \varphi_0)$	Нет	Противовесы не нужны
Нет	Нет	Противовесы не нужны
Нет	$M_1 = - 9 J_c \omega^2 C_1$	$m_g = \frac{r}{r_1} (2,5 m_k + m_b)$
$M_x = - 8,5 m r \omega^2 Z \cos \varphi_0$	Нет	$m_g = \frac{r}{r_1 a_g} (3,5 a_k m_k + a_b m_b)$
$M_x = - 8,5 m r \omega^2 Z \sin \varphi_0$	Нет	$m_g = \frac{r}{r_1 a_g} (3,5 a_k m_k + a_b m_b)$