Судовые двигатели внутреннего сгорания

Лектор: Доцент кафедры ДВС И АСЭУ, к.т. н., **ЖИВЛЮК Григорий Евгеньевич**

Конт. Тел. **9190946**

Лекция 17

- Неуравновешенность поршневого ДВС
- Внешняя и внутренняя неуравновешенность многоцилиндрового ДВС
- Способы уравновешивания поршневых ДВС

Неуравновешенность поршневого ДВС

Неуравновешенность ДВС

- Под **неуравновешенностью** *понимают наличие периодических сил и их моментов, передающихся на фундамент двигателя во время его работы и вызывающих вибрации как самого двигателя, так и фундамента (корпуса судна).*

Из ранее рассмотренных переменных циклически действующих сил – сил действия газов $P_г$ и сил инерции P_j, силы давления газов являются уравновешенными силами и не передаются (замыкаются) на остов двигателя. (Действуют одновременно и разнонаправленно на поршень и крышку цилиндра - стремясь сдвинуть первый и «оторвать» от блока вторую).

Неуравновешенность ДВС

Единственными силами, создающими неуравновешенность и вызывающие вибрации двигателя являются силы инерции и их моменты.

К силам инерции относят:

- силы инерции поступательно движущихся масс – ПДМ (поршневая группа, часть шатуна для тронкового и поршень с кольцами, шток, крейцкопф и часть шатуна для крейцкопфных двигателей);
- центробежные силы от вращающихся масс (часть шатуна, мотылевая (шатунная) шейка, часть щеки (щек) коленчатого вала).

Неуравновешенность ДВС

Действие силы инерции ПДМ подчиняются довольно сложному закону и в результате разложения функции в ряд, могут рассматриваться как сумма сил инерции первого, второго и т.д. порядков:

$$P_j = P_{jI} + P_{JII} + \cdots .$$

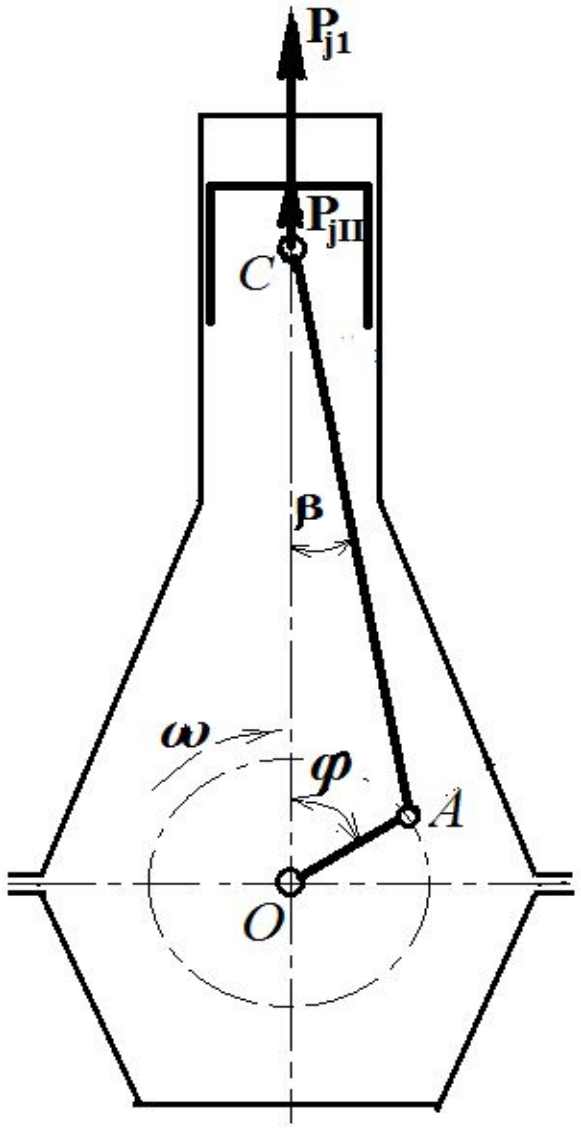
Отбросим все порядки выше второго и тогда:

$$P_{jI} = m_{\text{п}} \cdot r \cdot \omega^2 \cdot cos\varphi = P_I \cdot cos\varphi,$$

$$P_{jII} = m_{\text{п}} \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \lambda_{\text{ш}} \cdot cos2\varphi = P_{II} \cdot cos2\varphi.$$

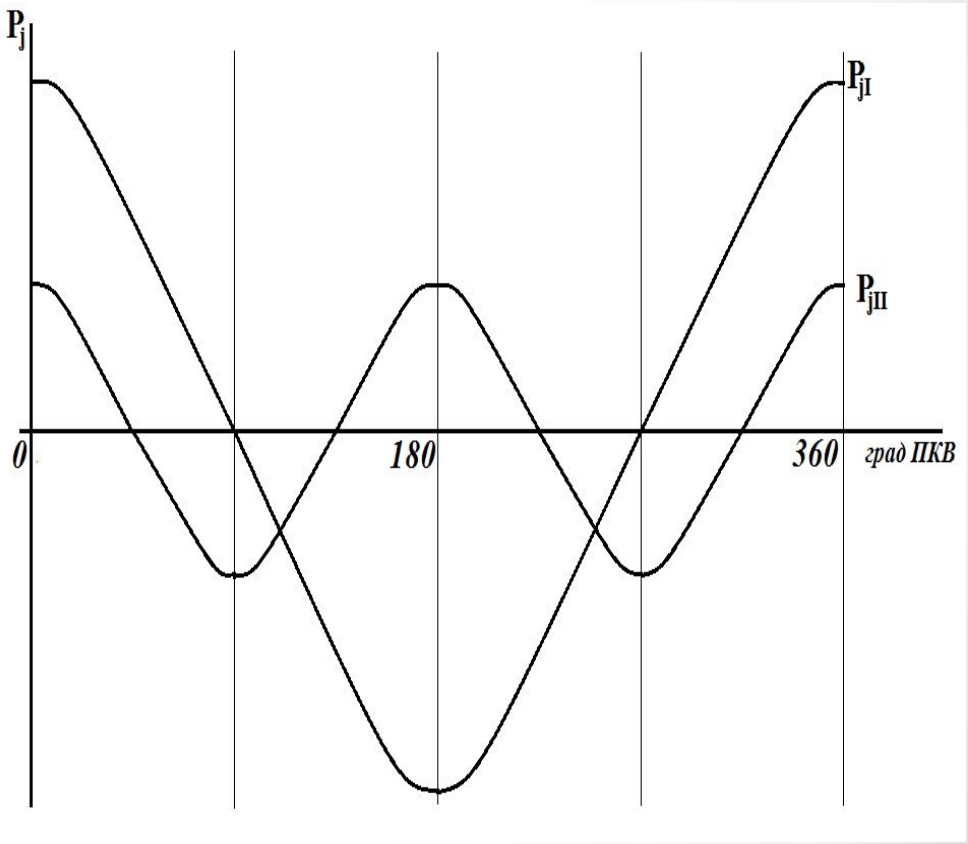
Неуравновешенность ДВС

Силы инерции первого и второго порядка действуют по оси цилиндра, приложены к оси ВГШ (ось пальца, точка С) и в течении цикла постоянно меняются по величине и направлению но всегда остаются в плоскости, проходящей через ось цилиндров двигателя. При этом сила P_{jI} больше приблизительно в 2 – 5 раз, чем P_{jII} ($\lambda_{ш} = 1/2{,}2 - 1/5$).



Неуравновешенность ДВС

Внешнее воздействие силы инерции P_{jI} и P_{jII} состоит в стремлении оторвать двигатель от фундамента (когда они направлены вверх) или прижать к фундаменту (когда направлены вниз). Частота воздействия сил кратна угловой скорости вращения коленчатого вала (ω и 2ω).



Неуравновешенность ДВС

- Кроме действия силы инерции поступательно движущихся масс, конструкция двигателя и фундамент нагружается силами инерции вращающихся масс. Центробежная сила инерции определяется из:

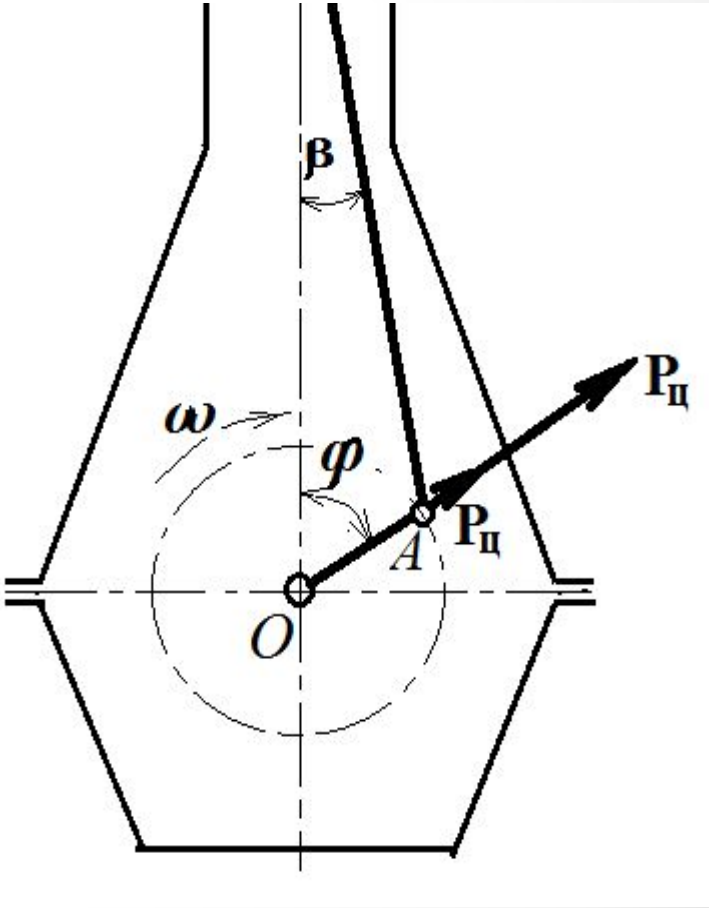
$$P_{\text{ц}} = m_{\text{вр}} r \omega^2 \ .$$

Здесь $m_{\text{вр}}$ масса вращающихся деталей, включая: массу вращающейся части шатуна $m_{\text{ш.вр}}$, массы шатунной шейки $m_{\text{ш}}$ и неуравновешенная массы щек $m_{\text{щ}}$,

$$m_{\text{вр}} = m_{\text{ш.вр}} + m_{\text{ш}} + m_{\text{щ}}.$$

Неуравновешенность ДВС

Центробежная сила $P_ц$ приложена к центру кривошипного соединения (точка А). После переноса вектора по линии действия в точку О, и представления силы в виде радиус-вектора, становится очевидным, что *центробежная сила вращается вместе с коленчатым валов в плоскости кривошипа, постоянно изменяя направление своего действия.*

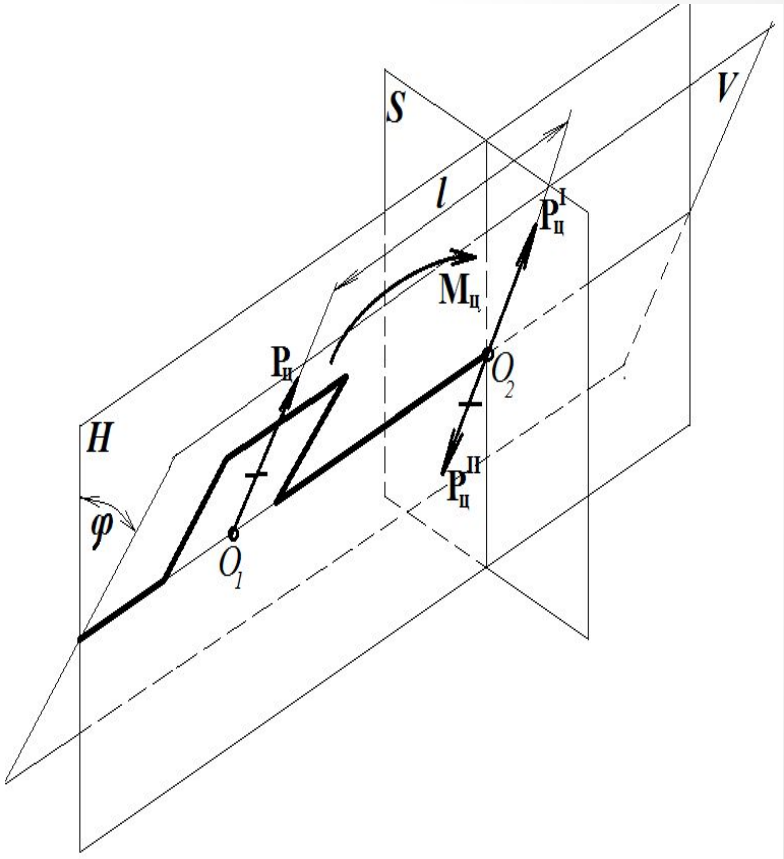


Неуравновешенность ДВС

Внешнее воздействие центробежной силы заключается в стремлении сместить двигатель с фундамента в плоскости, совпадающей в каждый момент времени с плоскостью кривошипа и проходящей через ось коленчатого вала.

Неуравновешенность ДВС

- Приведем силу инерции вращающихся масс $P_{ц}$, перенесенную в точку O_1 и действующую в данный момент времени в плоскости V, наклоненной под углом φ к плоскости оси цилиндров H к точке O_2, которая лежит на плоскости центра масс двигателя S. Получаем момент сил $P_{ц}''$ и $P_{ц}$ и приведенную силу $P_{ц}'$.



Неуравновешенность ДВС

- Полученный момент

$$M_{\text{ц}} = P_{\text{ц}} l = m_{\text{ц}} r \omega^2 l$$

называют моментом центробежной силы. Он , как и сила $P_{\text{ц}}$ остаются неизменными по абсолютной величине (при постоянстве ω) и переменными по направлению, действуя в плоскости колена вала, вращающейся вместе с кривошипом с частотой вращения ω. Аналогично для моментов сил инерции поступательно движущихся масс первого и второго порядков:

$$M_I = P_{jI} l = m_{\text{п}} r \omega^2 l \cdot cos\varphi$$

$$M_{II} = P_{jII} l = m_{\text{п}} r \omega^2 l \cdot \cos 2\varphi$$

Внешняя и внутренняя неуравновешенность многоцилиндрового ДВС

Неуравновешенность многоцилиндрового ДВС

- В пределах каждого из цилиндров многоцилиндрового двигателя одновременно действуют:
- сила инерции вращающихся масс $P_{\text{ц}i}$;
- сила инерции поступательно движущихся масс (ПДМ) первого порядка P_{JI_i} ;
- сила инерции ПДМ второго порядка P_{JII_i} ;
- момент центробежной силы $M_{\text{ц}i}$;
- момент сил инерции ПДМ первого и второго порядков M_{I_i} и M_{II_i} соответственно.

Неуравновешенность многоцилиндрового ДВС

Для определения суммарного эффекта от их действия для двигателя в целом, необходимо найти по отдельности для каждого параметра векторные суммы:

- $\sum_1^i \vec{P}_{\text{ц}_i}$ - для центробежных сил;
- $\sum_1^i \vec{P}_{jI_i}$ - для сил инерции ПДМ первого порядка;
- $\sum_1^i \vec{P}_{jII_i}$ - для сил инерции ПДМ второго порядка;
- $\sum_1^i \vec{M}_{\text{ц}_i}$ - для моментов центробежных сил;
- $\sum_1^i \vec{M}_{I_i}$ - для моментов сил инерции ПДМ первого порядка;
- $\sum_1^i \vec{M}_{II_i}$ - для моментов сил инерции ПДМ второго порядка.

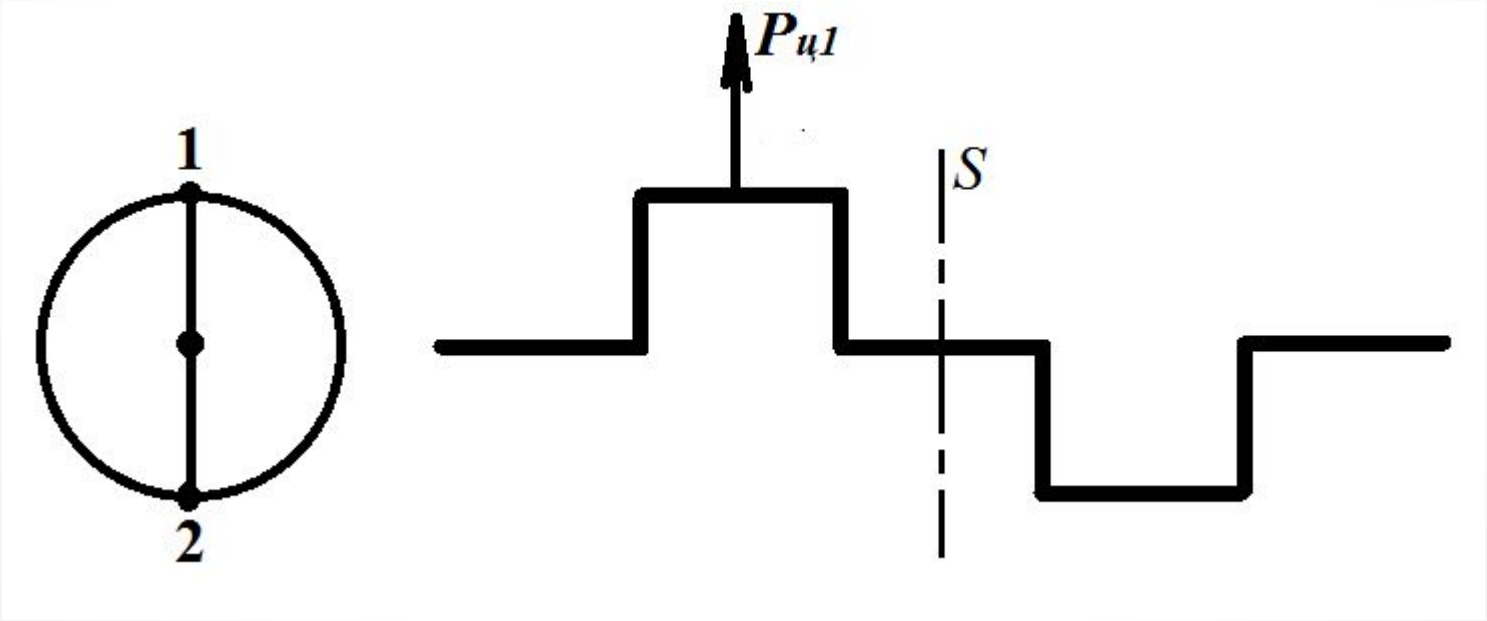
Неуравновешенность многоцилиндрового ДВС

Если векторные суммы всех приведенных компонентов окажутся равны нулю, то такой двигатель будет ***полностью внешне уравновешенным.*** В таком двигателе силы и момента сил инерции компенсируют друг друга и не передаются на фундамент двигателя и, следовательно, на корпус судна.

Если условие полной внешней уравновешенности частично или полностью не выполняется, то такой двигатель считается ***внешне неуравновешенным***. Силы или моменты будут выходить за пределы остова двигателя, т.е. циклически нагружать фундамент и конструкции корпуса судна, вызывая вибрации.

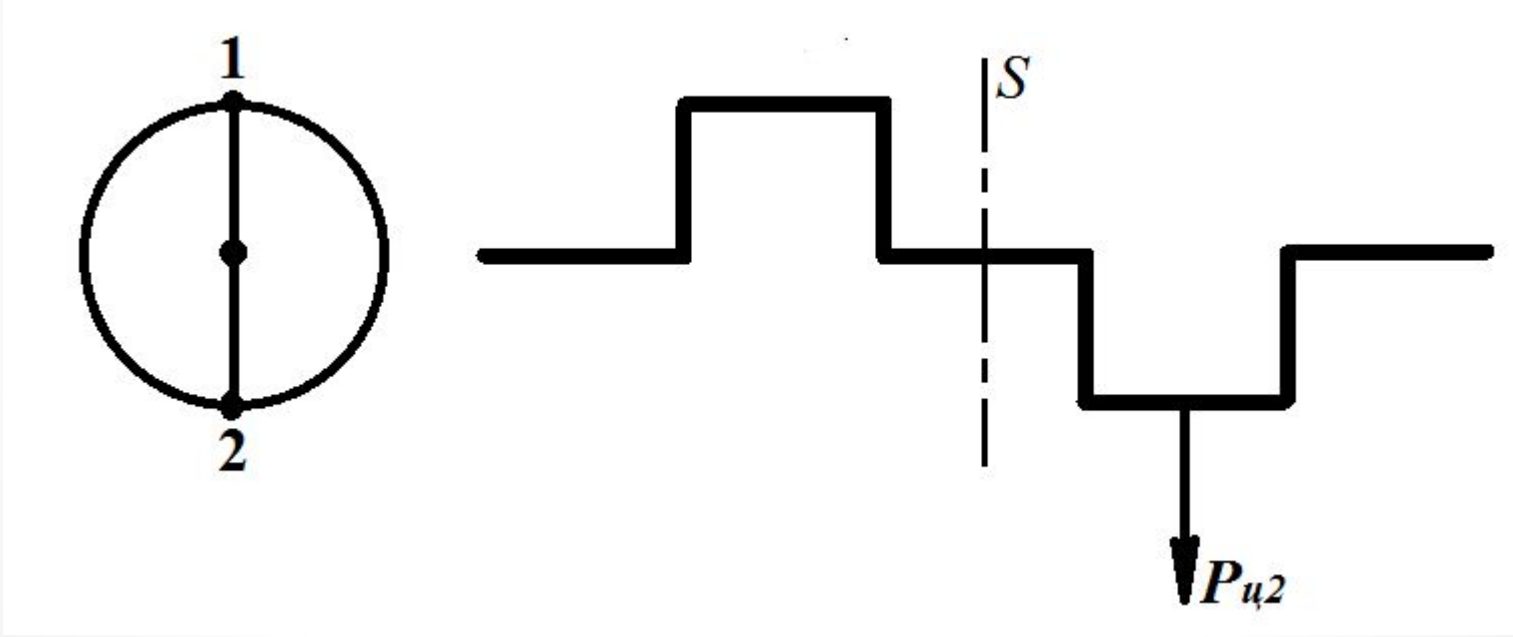
Неуравновешенность многоцилиндрового ДВС

Рассмотрим действие сил инерции вращающихся масс в двухцилиндровом двигателе. Центробежная сила первого цилиндра:



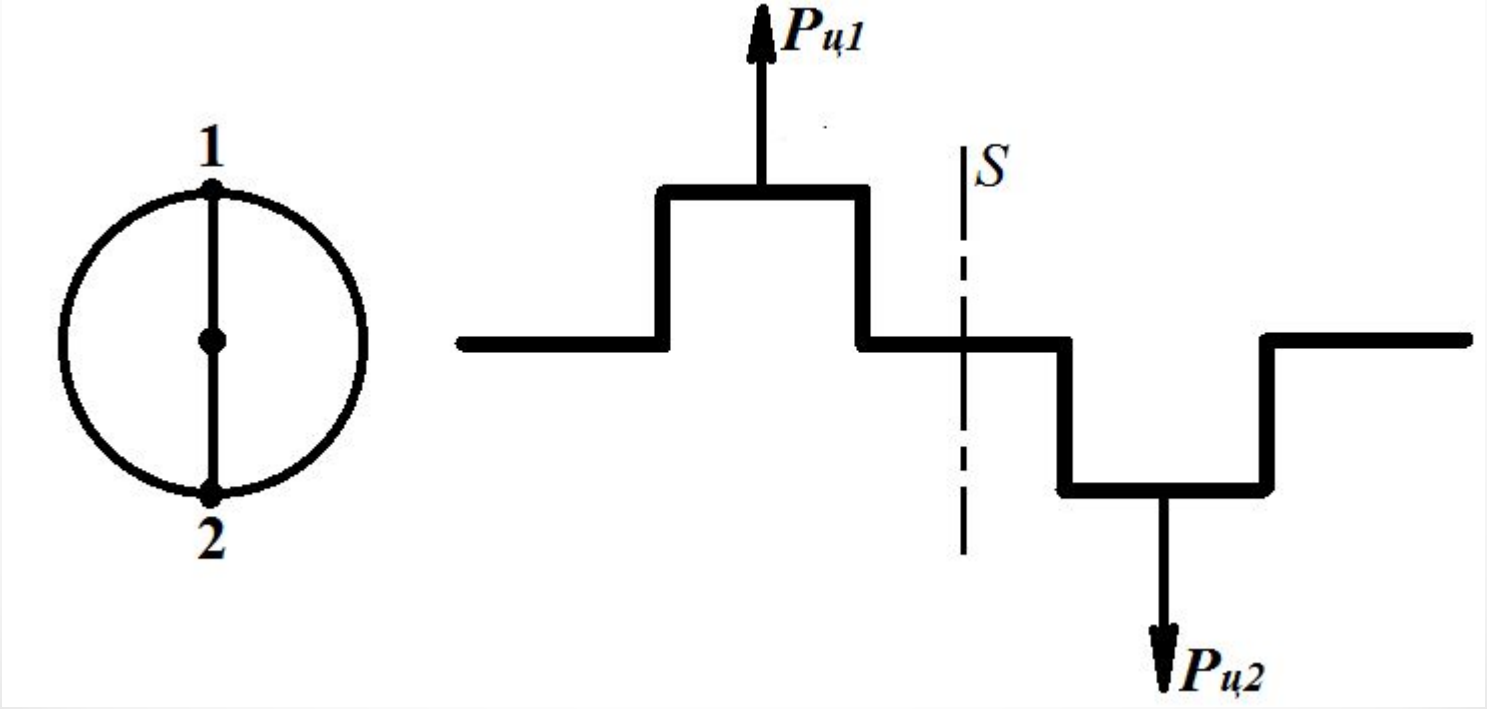
Неуравновешенность многоцилиндрового ДВС

Центробежная сила второго цилиндра:



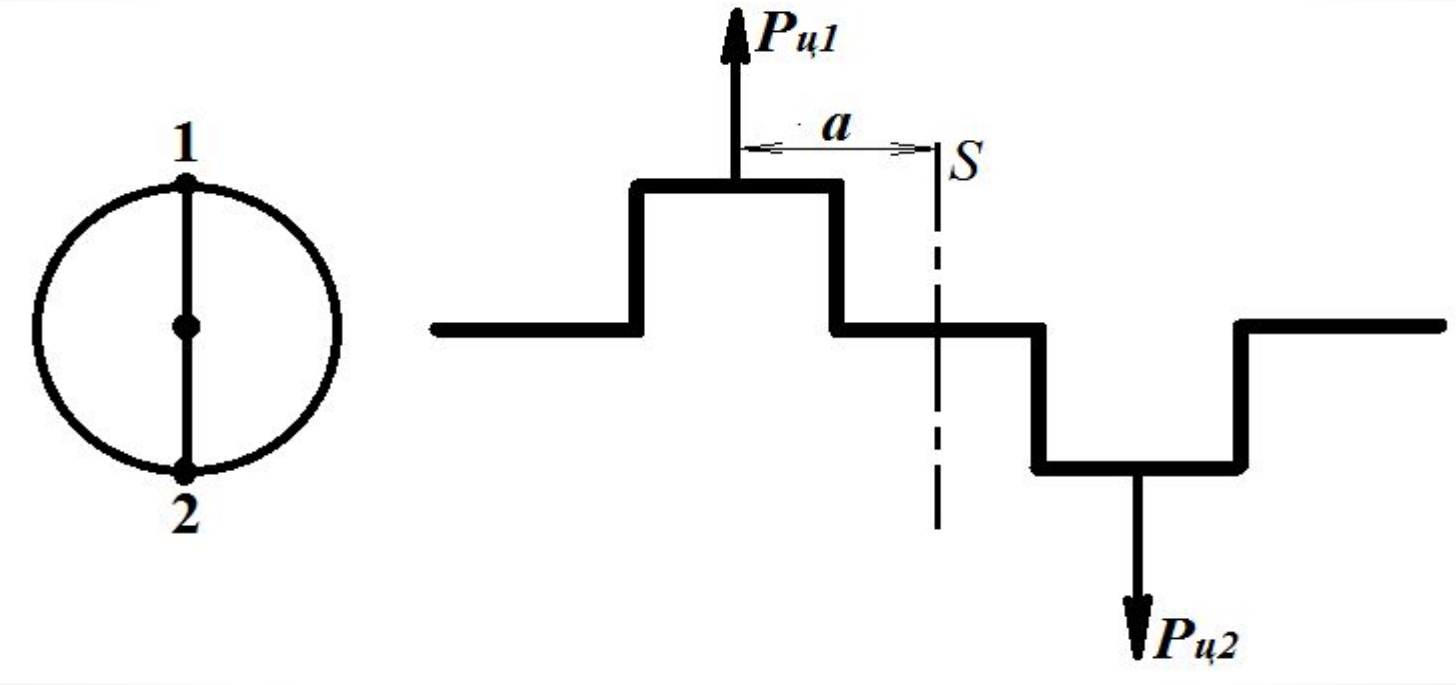
Неуравновешенность многоцилиндрового ДВС

Действуя одновременно, центробежные силы первого и второго цилиндра, равные по величине и противоположно направленные, дают векторную сумму, равную нулю:



Неуравновешенность многоцилиндрового ДВС

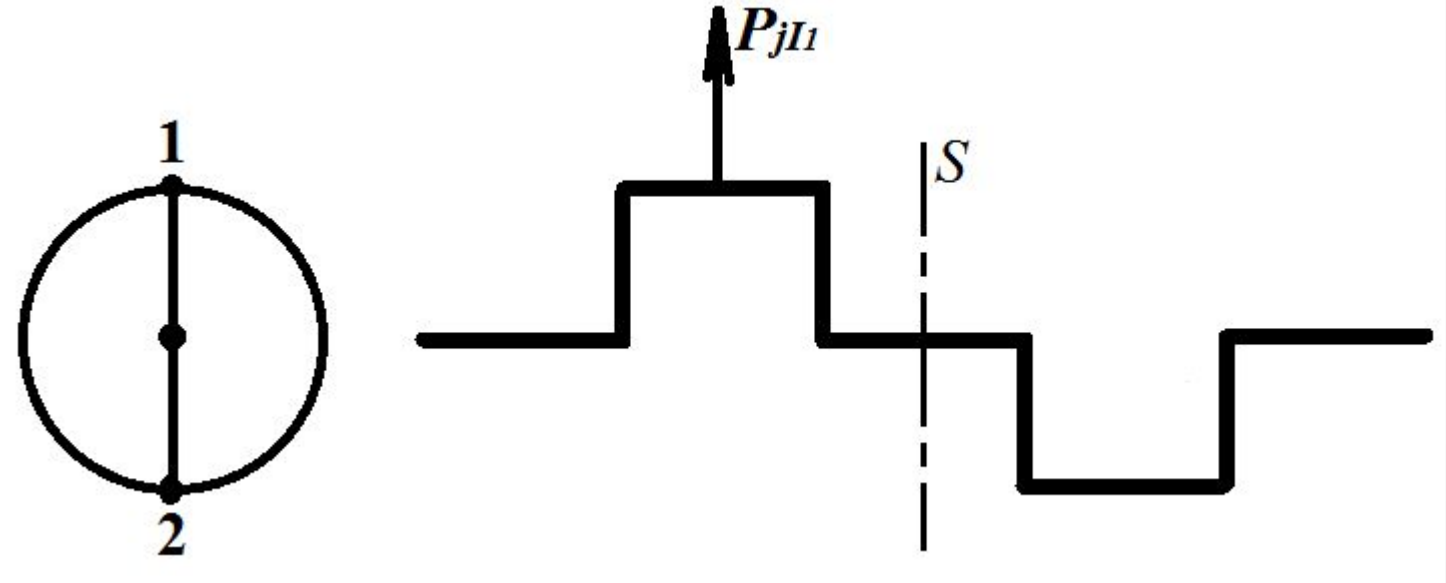
- При этом создают момент центробежных сил на плече a



Таким образом, $\sum P_{\text{ц}i} = 0$, а $\sum M_{\text{ц}i} = P_{\text{ц}} \cdot a.$

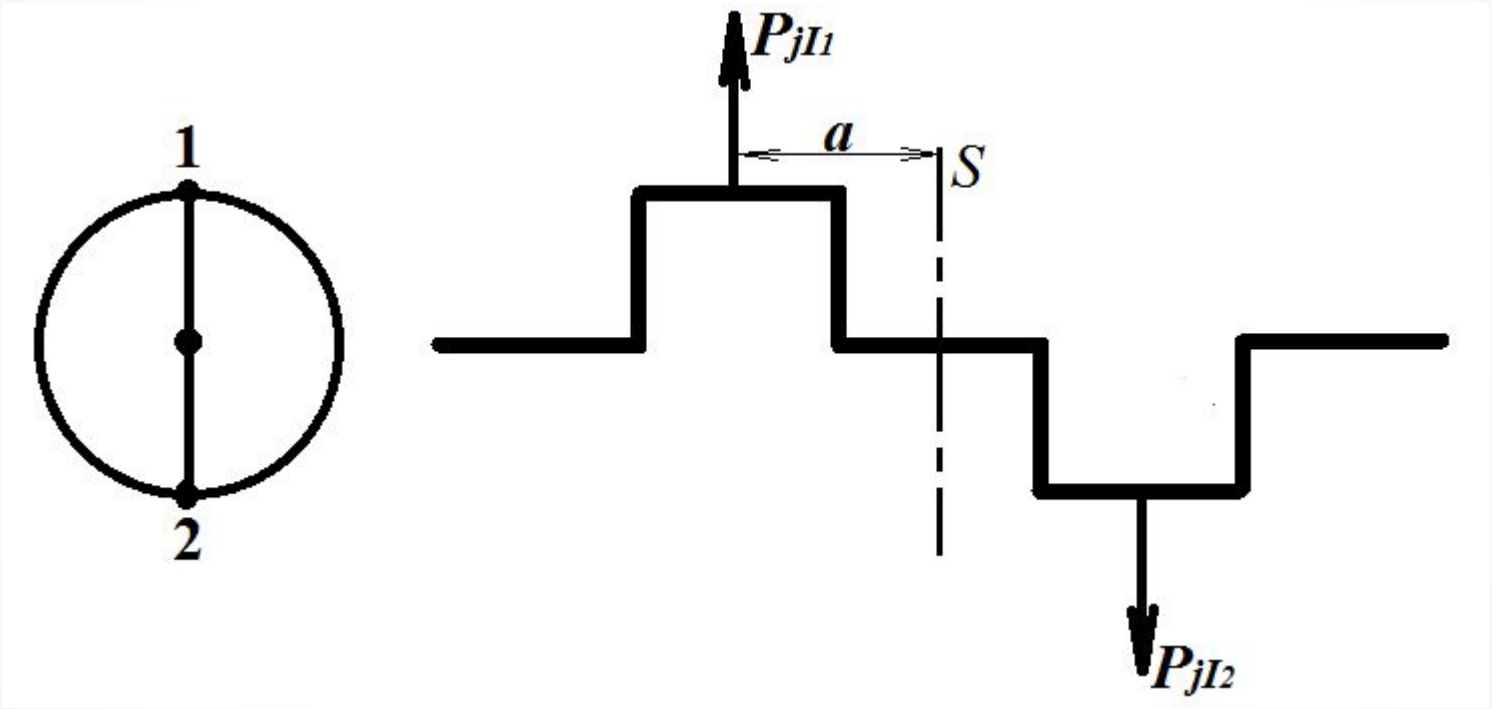
Неуравновешенность многоцилиндрового ДВС

Аналогичные размышления проведем для сил инеции ПДМ первого порядка. Для первого цилиндра:



Неуравновешенность многоцилиндрового ДВС

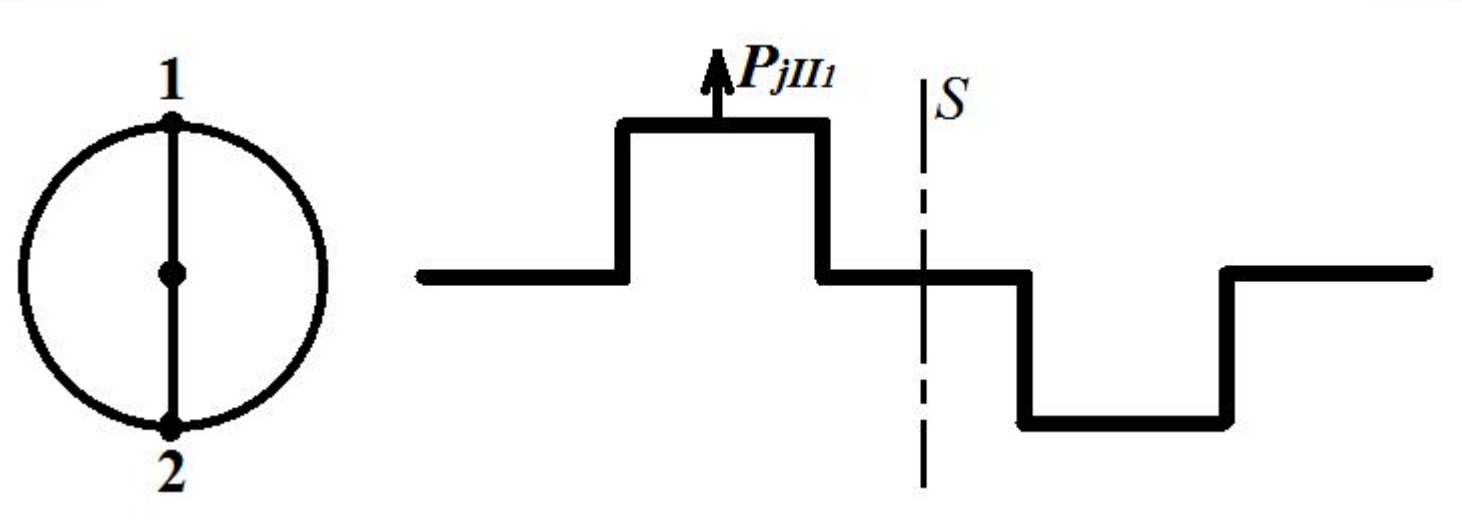
Для второго цилиндра и всего двигателя:



Следовательно, $\sum P_{jI_i} = 0$, а $\sum M_{jI_i} = P_{jI} \cdot a$.

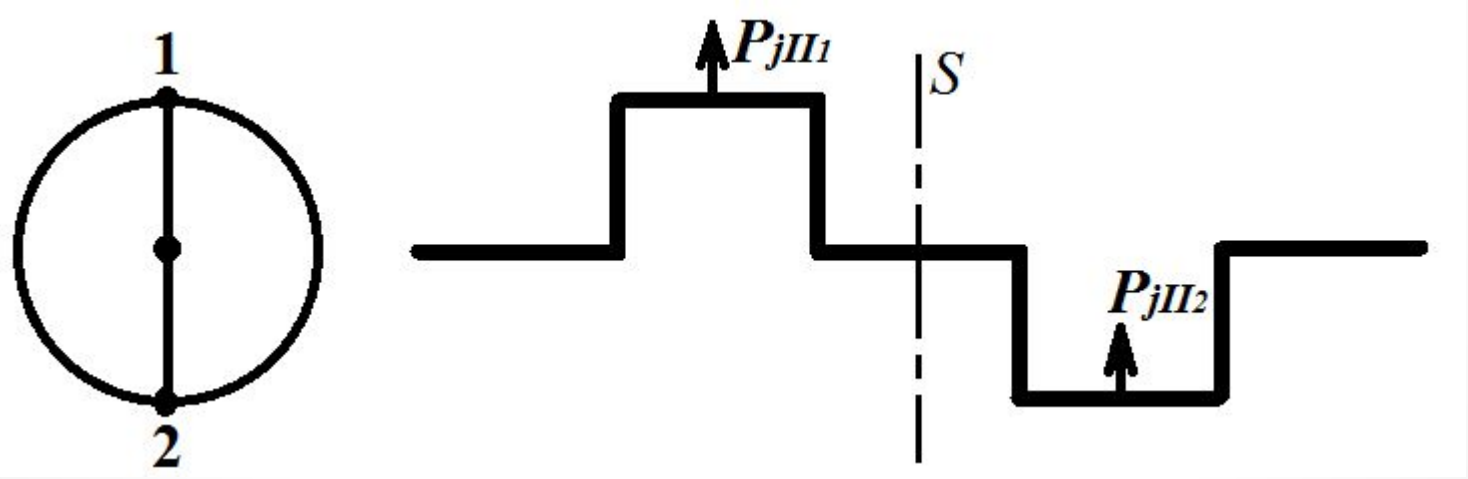
Неуравновешенность многоцилиндрового ДВС

Действующая сила инерции ПДМ второго порядка в разы меньше, чем сила инерции ПДМ первого порядка, для первого цилиндра:



Неуравновешенность многоцилиндрового ДВС

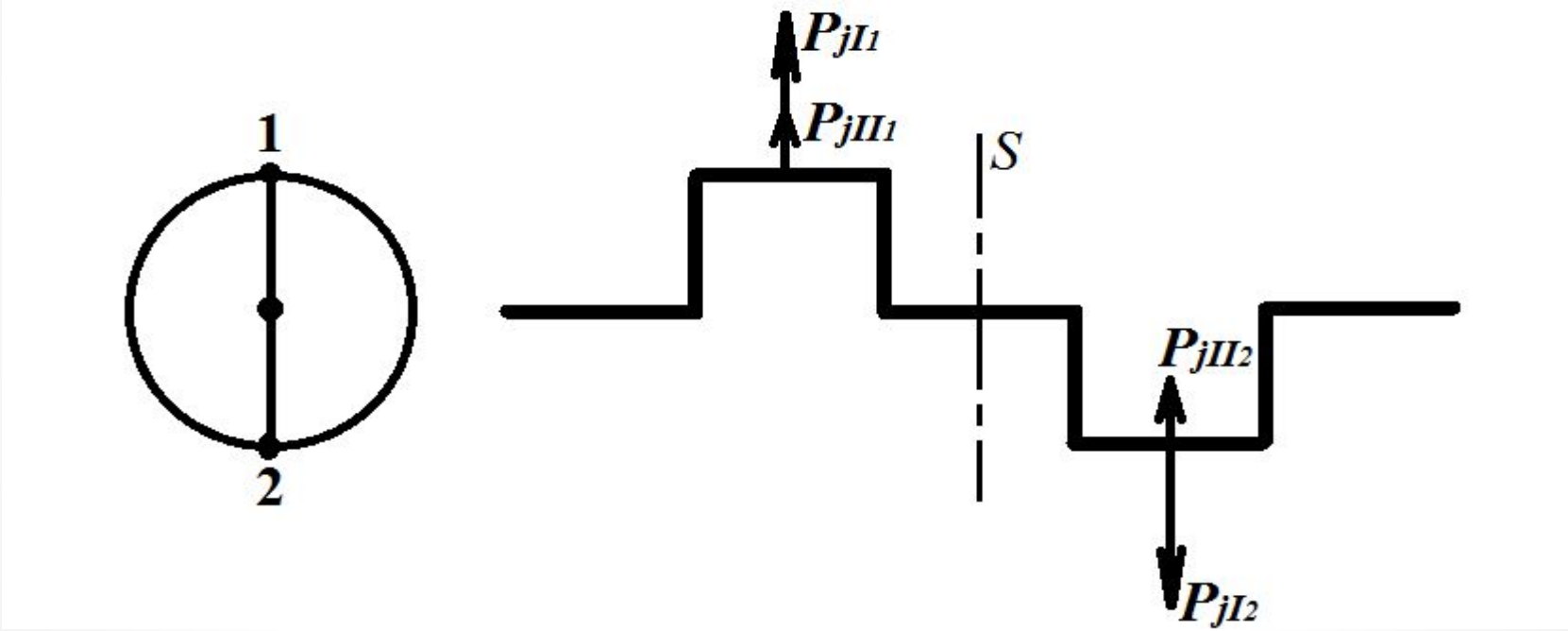
Для второго цилиндра, сила инерции ПДМ второго порядка направлена с учетом того, что в формуле для сил инерции второго порядка 2α, т.е $2 \cdot 180° = 360°$:



И тогда $\sum P_{jII_i} = 2P_{jII}$, при этом силы не создают момента и $\sum M_{jII_i} = 0$.

Неуравновешенность многоцилиндрового ДВС

В итоге для двухцилиндрового двигателя получаем:

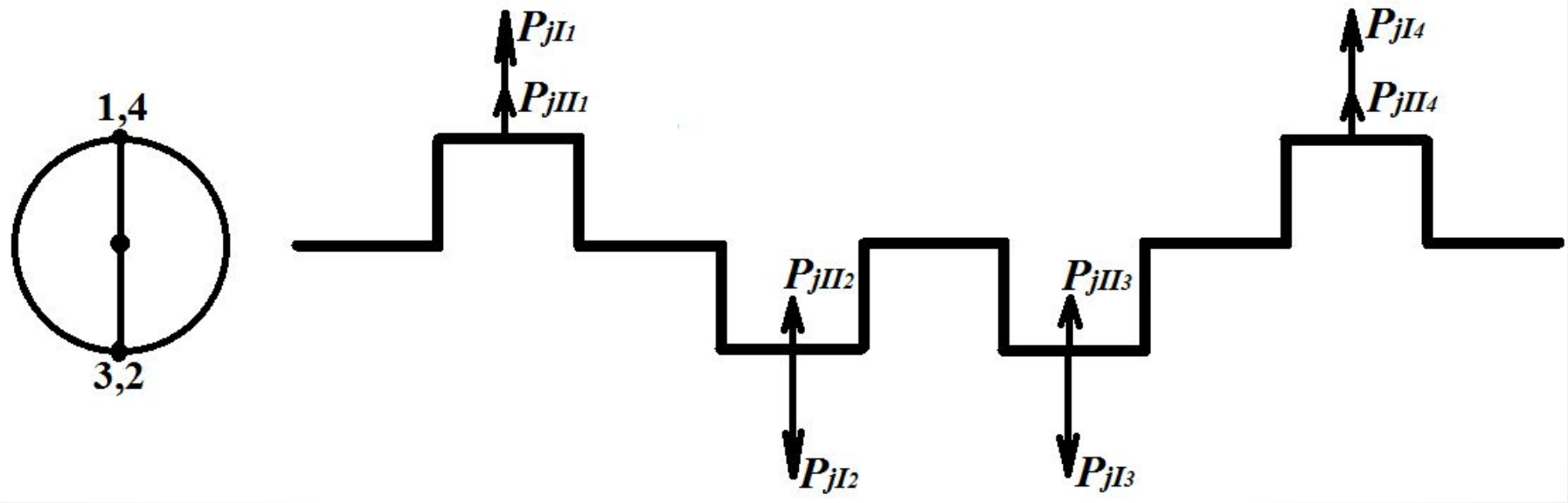


$$\sum_1^2 P_{ц_i} = 0; \quad \sum_1^2 P_{jI_i} = 0; \quad \sum_1^2 P_{jII_i} = 2P_{jII};$$

$$\sum_1^2 M_{ц_i} = P_ц \cdot a; \quad \sum_1^2 M_{I_i} = P_{jI} \cdot a; \quad \sum_1^2 M_{II_i} = 0.$$

Неуравновешенность многоцилиндрового ДВС

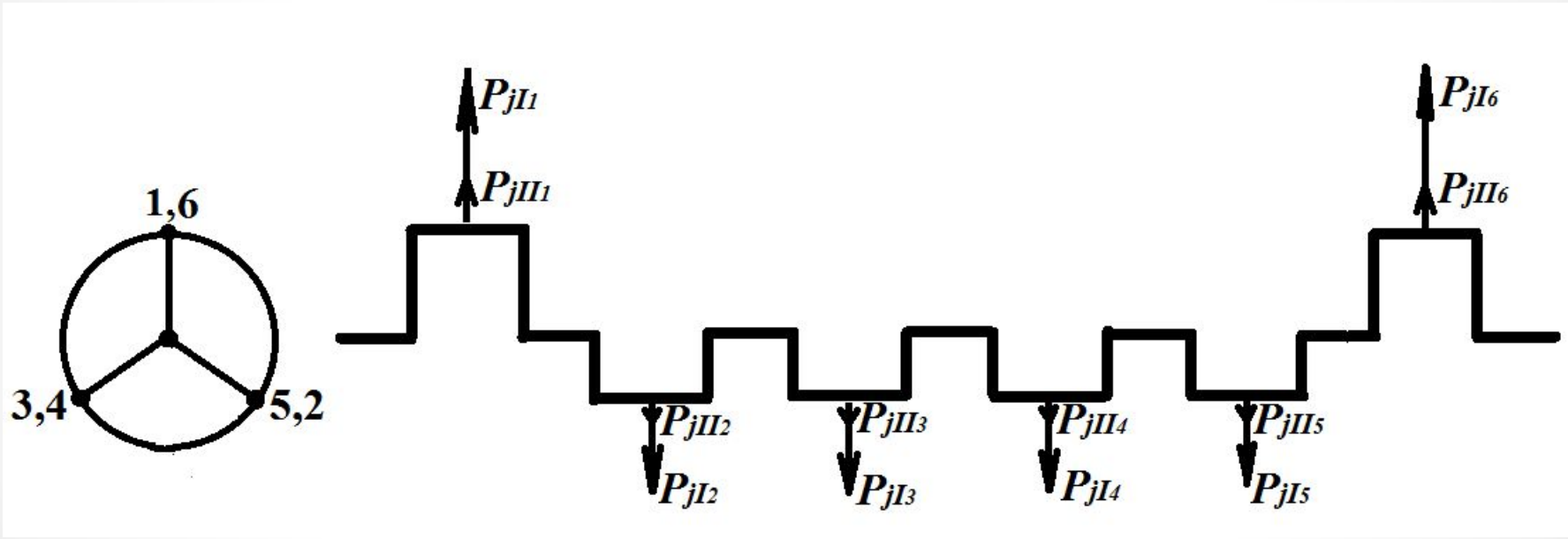
для четырехцилиндрового двигателя



$$\sum_1^4 P_{ц_i} = 0; \quad \sum_1^4 P_{jI_i} = 0; \quad \sum_1^4 P_{jII_i} = 4P_{jII};$$
$$\sum_1^4 M_{ц_i} = 0; \quad \sum_1^4 M_{I_i} = 0; \quad \sum_1^4 M_{II_i} = 0.$$

Неуравновешенность многоцилиндрового ДВС

для шестицилиндрового двигателя



$$\sum_1^6 P_{\text{ц}i} = 0; \quad \sum_1^6 P_{jI_i} = 0; \quad \sum_1^6 P_{jII_i} = 0;$$

$$\sum_1^6 M_{\text{ц}i} = 0; \quad \sum_1^6 M_{I_i} = 0; \quad \sum_1^6 M_{II_i} = 0.$$

Неуравновешенность многоцилиндрового ДВС

Несмотря на то, что отдельные конструкции двигателей позволяют исключить воздействие сил инерции и их моментов на фундамент, их действие внутри двигателя не прекращается и ***двигатель внутренне не может быть уравновешен от сил инерции никогда***.

Силы инерции вращающихся масс, действуя в плоскости колена вала, и силы инерции поступательно движущихся масс первого и второго порядка, действующие в плоскости осей цилиндра, нагружают подшипники коленчатого вала и сам вал, а также передаются фундаментной раме. Моменты сил инерции стремятся изогнуть вал в плоскости своего действия.

Неуравновешенность многоцилиндрового ДВС

Важно понимать, что силы и моменты инерции, хотя и нагружают детали двигателя, полезной работы не совершают. Поэтому работа сил и моментов инерции на стационарном режиме работы двигателя всегда равна нулю.

Аналогом сил и моментов инерции в электрической среде могут являться реактивные токи, которые нагружают обмотки, но полезной работы не совершают.

Способы уравновешивания поршневых ДВС

Способы уравновешивания поршневых ДВС

В принципе, задача уравновешивания сил инерции вращающихся и поступательно движущихся масс и их моментов представляется различными задачами.

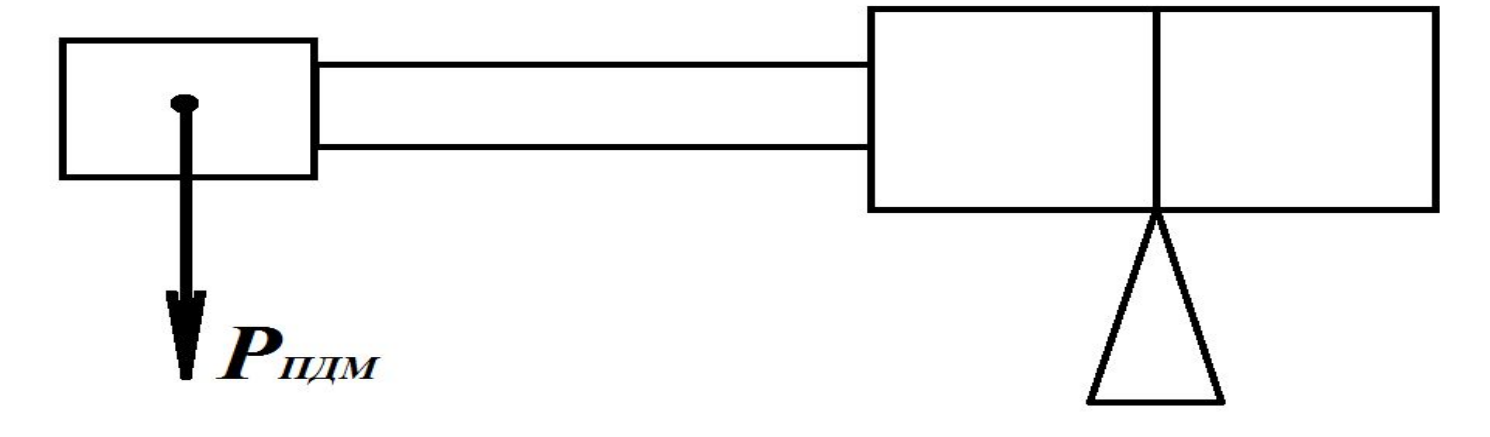
Все дальнейшие размышления справедливы только в случае равных сил инерции для отдельно взятых цилиндров двигателя. В обеспечение этого важного требования необходимо произвести выравнивание масс всех деталей движения для всех цилиндров.

Способы уравновешивания поршневых ДВС

Для этого необходимо: во-первых, подогнать по массе все поршнекомплекты двигателя (поршень, кольца, палец и стопора для тронкового двигателя или поршень, кольца, шток, башмак и шарнир крейцкопфа – для крейцкопфного); во-вторых проверить балансировку коленчатого вала (статическую и динамическую) и устранить дисбаланс; в-третьих устранить разновес шатунов. Нормы точности процедур приводятся в инструкции завода-изготовителя.

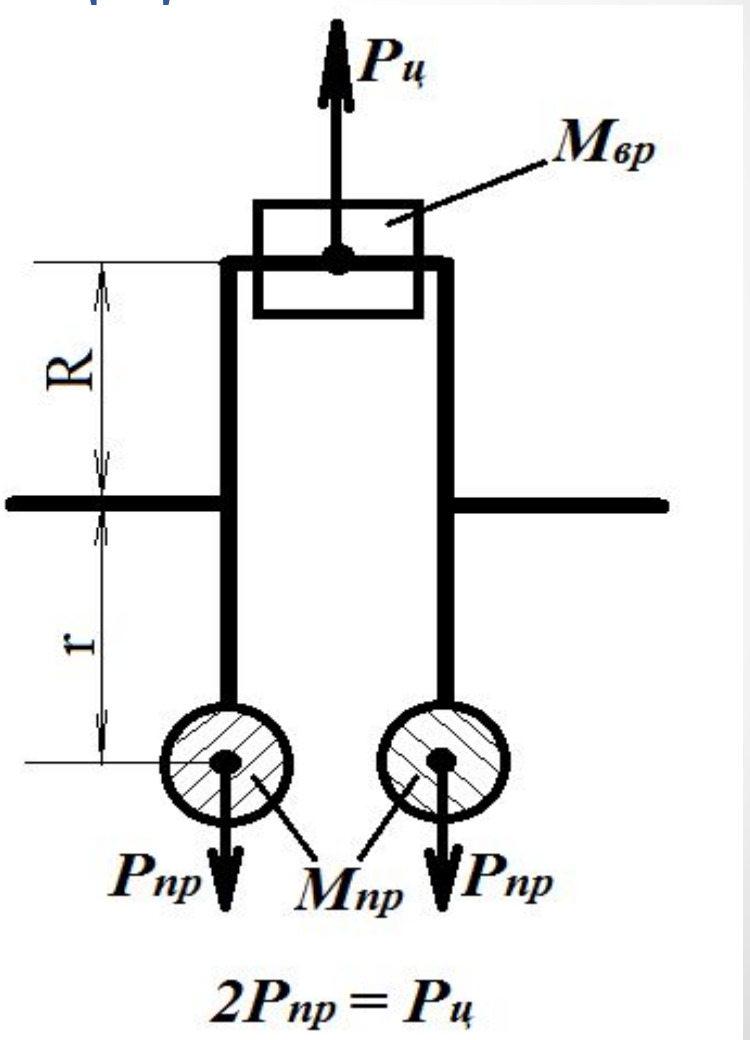
Способы уравновешивания поршневых ДВС

Масса шатуна должна быть разделена на поступательно движущуюся и вращательную массу (обычно 3:1 по длине), устранение разновеса шатунов выполняется исходя из двух условий. А именно, равенство масс, как таковых, и равенство измеренного веса верхней головки шатуна при установки шатуна на ножи в плоскости разъема НГШ.



Способы уравновешивания поршневых ДВС

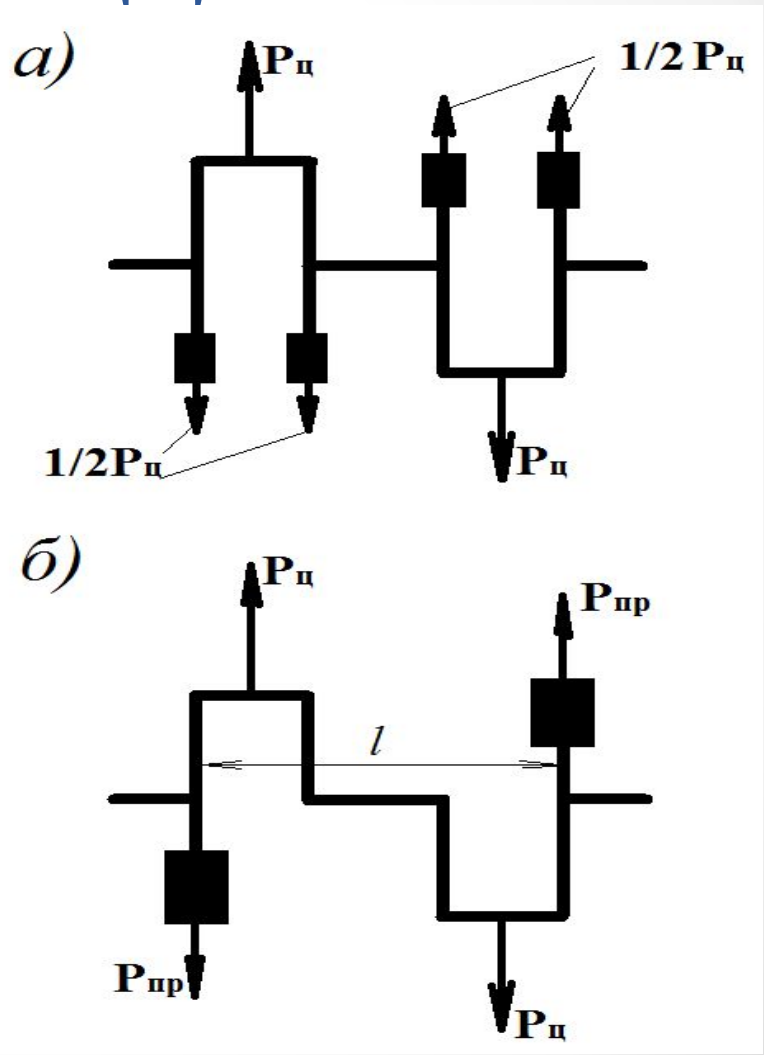
Уравновешивание сил инерции вращающихся масс может быть достигнуто путем установки/изготовления противовесов на щеках коленчатого вала, центробежная сила которых скомпенсирует центробежную силу суммарной вращающейся массы деталей группы движения. $2M_{\text{пр}}r\omega^2 = M_{\text{вр}}R\omega^2$.



Способы уравновешивания поршневых ДВС

Уравновешивание моментов центробежных сил может обеспечиваться либо уравновешиванием сил в отдельно взятом цилиндре (а) или установке двух противовесов на коленчатом валу, создающих момент, равный неуравновешенному (б)

$$\sum M_{\text{ц}} = P_{\text{пр}} \cdot l \ .$$

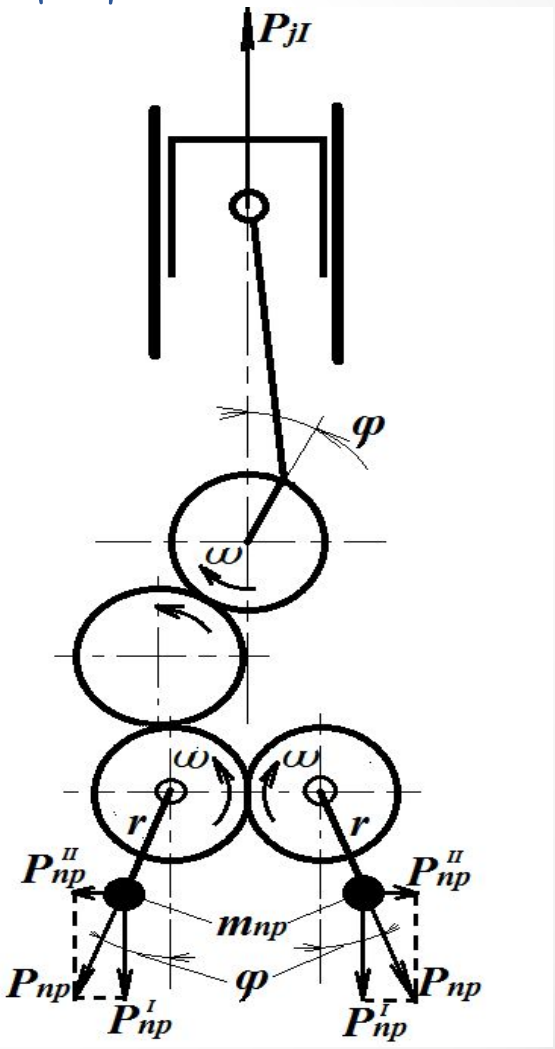


Способы уравновешивания поршневых ДВС

Уравновешивание сил инерции поступательно движущихся масс (ПДМ) не может быть достигнуто установкой противовесов на коленчатом валу. Для уравновешивания необходимо использовать две неуравновешенные вращающиеся в противоположных направлениях синхронно с коленчатым валом массы. В результате конструктивное решение уравновешивания выливается в создание специальных механизмов, которые называются ***механизмом уравновешивания***.

Способы уравновешивания поршневых ДВС

Для того, чтобы уравновесить силы инерции первого порядка, потребуется установка механизма уравновешивания, состоящего из двух валов, вращающихся в противоположных направлениях, с неуравновешенными мас-сами, приводимых в дей-ствие передачей с пере-даточным отношением 1:1. Например, для шестеренного привода:



Способы уравновешивания поршневых ДВС

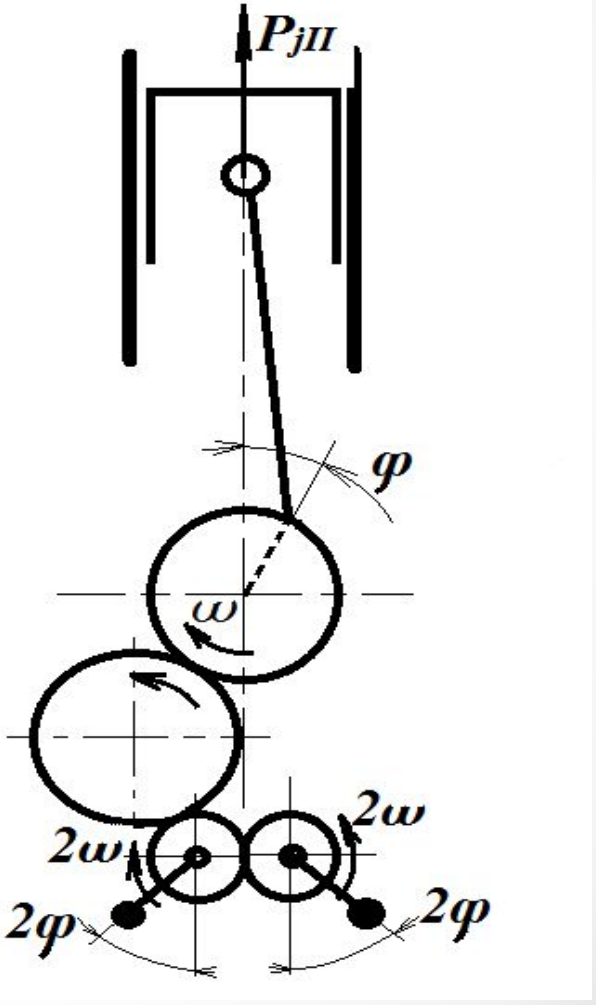
- Обязательным условием работы механизма уравновешивания является строгая ориентация валов механизма относительно коленчатого вала двигателя (Для позиционирования валов на приводных шестернях всегда будут нанесены отметки для совмещения). Тогда каждая из вращающихся неуравновешенных масс балансирного механизма создает центробежную силу $P_{\text{пр}} = m_{\text{пр}} \cdot r \cdot \omega^2$. Эту силу, в каждый момент времени, можно разложить на две составляющих – горизонтальную $P^{''}_{\text{пр}}$ и вертикальную - $P^{'}_{\text{пр.}}$

Способы уравновешивания поршневых ДВС

- Горизонтальные составляющие сил в каждый момент времени компенсируют друг друга, поскольку направлены противоположно, вертикальные составляющие – суммируются и оказывают воздействие на фундамент двигателя, противоположное силе инерции поступательно движущихся масс первого порядка. Для полного уравновешивания двигателя требуется достичь равенства $P_{jI} = 2 \cdot P'_{\text{пр}}$. В обеспечение последнего массы противовесов $m_{\text{пр}}$ и радиусы их вращения r должны быть соответственно рассчитаны.

Способы уравновешивания поршневых ДВС

Аналогичным образом можно уравновесить и силы инерции ПДМ второго порядка. Отличительной чертой такого механизма уравновешивания является то, что противовесы должны вращаться с удвоенной частотой в соответствии с законом действия уравновешиваемой силы. Поэтому передаточное отношение привода должно составлять 1:2.



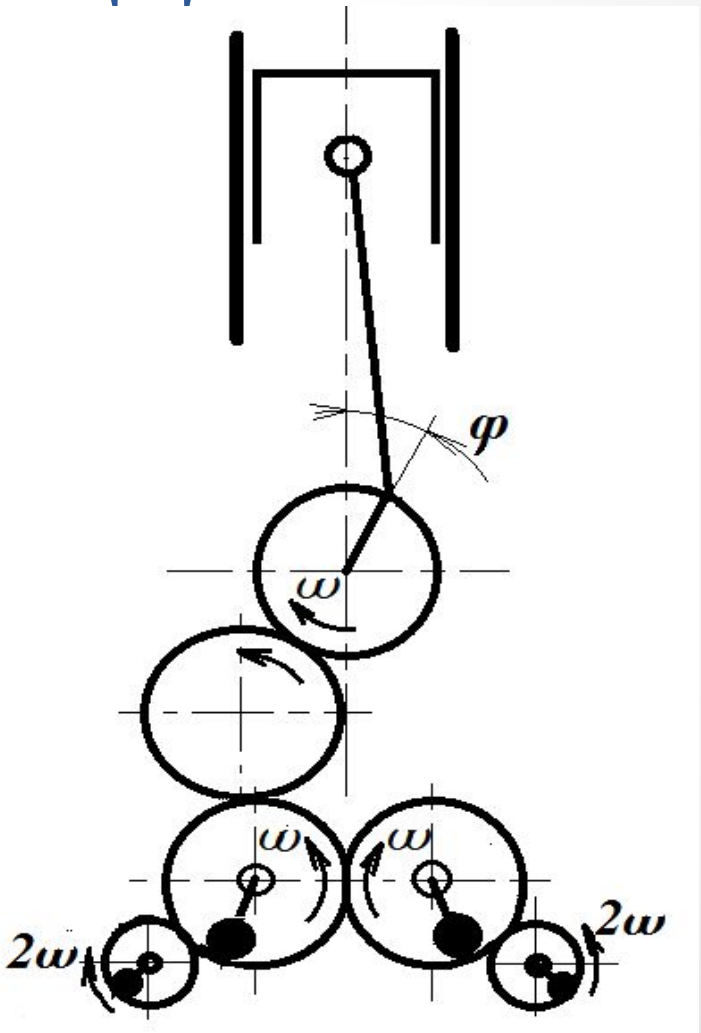
Способы уравновешивания поршневых ДВС

Принцип разложения центробежных сил противовесов механизма уравновешивания сил инерции ПДМ второго порядка идентичен силам, рассмотренным в механизме уравновешивания сил инерции ПДМ первого порядка, и суммарная вертикальная составляющая центробежных сил противовесов должна быть равна силе инерции ПДМ второго порядка.

В случае необходимости уравновешивать силы инерции ПДМ первого и второго порядка одновременно, рассмотренные механизмы совмещаются в одну общую конструкцию.

Способы уравновешивания поршневых ДВС

Такой механизм типичный для одноцилиндровых двигателей (или других агрегатов, использующих кривошипно-шатунный механизм, например, поршневых компрессоров), называют ***механизмом Ланчестера*** или «Ланчестер-Балансир».

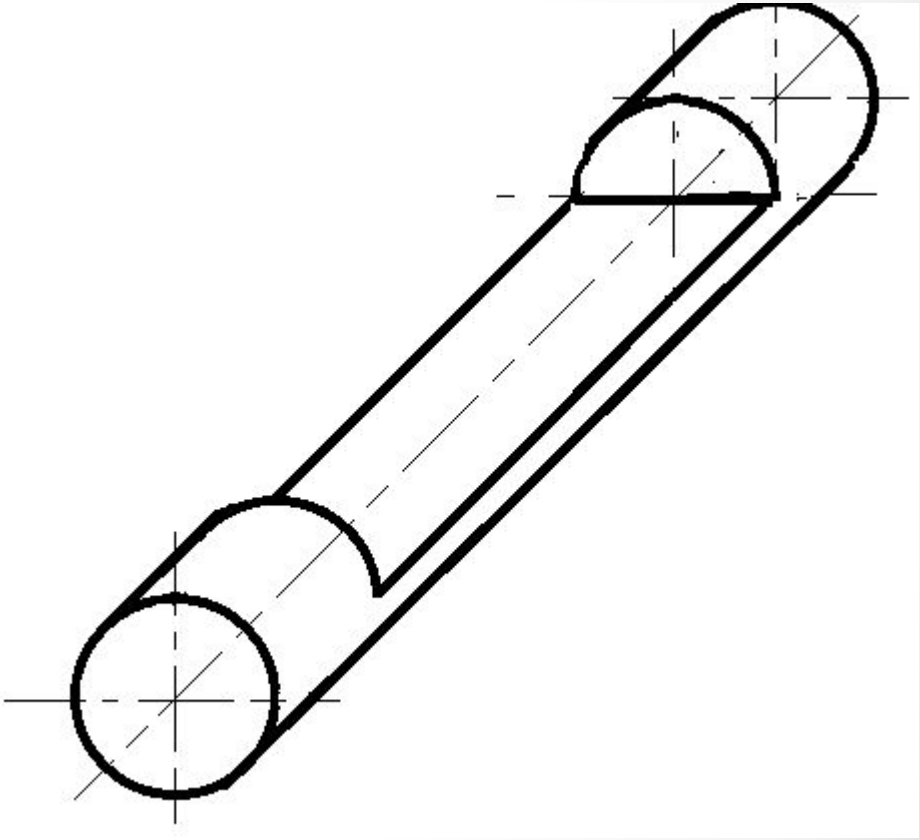


Способы уравновешивания поршневых ДВС

Размещение и конструкции балансирных валов крайне разнообразны, при этом, для уравновешивания сил инерции ПДМ, противовесы, схематически изображенные на рисунках, должны создавать суммарную приведенную равнодействующую силу, вектор которой должен располагаться в плоскости центра масс двигателя и оси цилиндров. В противном случае, возникнет момент сил, который будет стремиться опрокинуть двигатель.

Способы уравновешивания поршневых ДВС

Исходя из этого, а также для обеспечения технологичности и минимизации пространства, занимаемого механизмом, часто балансирный вал изготавливают с разнесенной по всей длине вала массой противовеса за счет удаления части материала вала на половине диаметра.

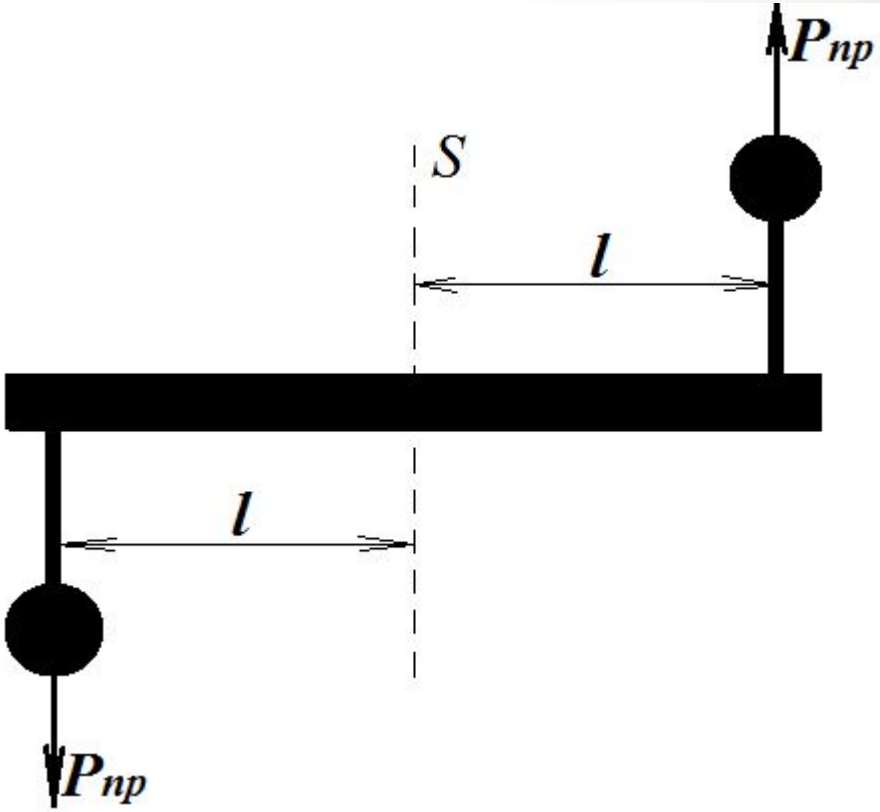


Способы уравновешивания поршневых ДВС

Для привода балансирных валов может быть использована цепная или зубчато-ременная передача (достаточно часто используемая в малоразмерных высокооборотных двигателях). При этом все выше оговоренные условия должны быть соблюдены неукоснительно (позиционирование, размещение центра масс противовесов, направление и частота вращения балансирных валов и др.).

Способы уравновешивания поршневых ДВС

Как уже отмечалось ранее подобные механизмы способны создавать момент сил, поэтому при необходимости уравновешивания двигателя по моментам сил инерции ПДМ, на балансирных валах могут быть размещены противовесы, которые, не создавая сил (статически уравновешенные), вызывают моменты центробежных сил $M_{\text{пр}} = P_{\text{пр}} \cdot 2l$. При соответствующей установке балансирных валов, горизонтальные составляющие будут скомпенсированы, а вертикальные уравновесят момент сил



Благодарю за внимание