

ДИНАМИКА КШМ

РАЗВЕРТКА ИНДИКАТОРНОЙ ДИАГРАММЫ

ПРИВЕДЕНИЕ КШМ К ДВУХМАССОВОЙ МОДЕЛИ

СИЛЫ И МОМЕНТЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ В КШМ

Цель анализа динамики КШМ заключается в описании методов определения сил, действующих на его элементы, в изучении взаимосвязи между кинематическими параметрами элементов, их массами, силами, вызывающими движение, силами и моментами взаимодействия ДВС с транспортным средством. В результате анализа динамики КШМ получают исходные данные для оценки его уравновешенности, равномерности хода, по наиболее неблагоприятным режимам работы ДВС и соответствующим им нагрузкам для прочностного расчета его деталей.

В КШМ действуют силы от давления газов в цилиндре двигателя, силы инерции движущихся масс механизма, силы трения и момент полезного сопротивления. При динамическом анализе КШМ обычно из-за малости сил трения ими пренебрегают.

Силы давления газов

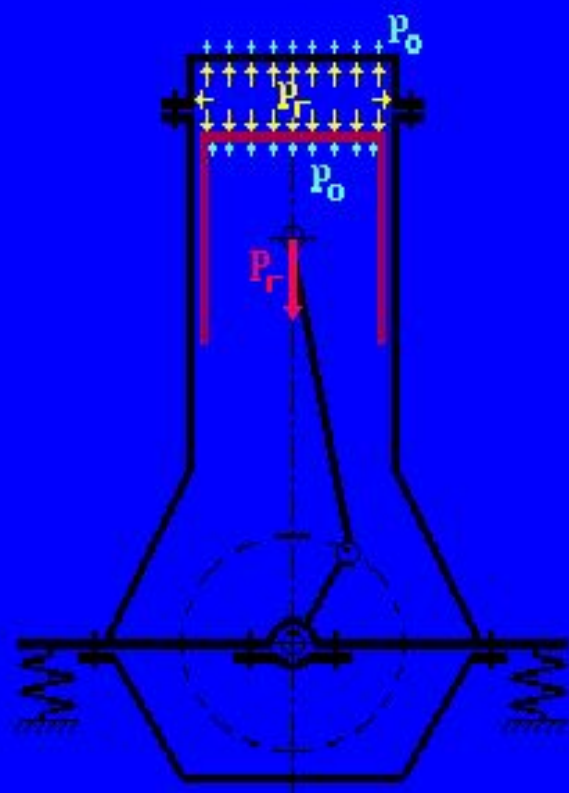
Реализация рабочего цикла в цилиндре ДВС создает движущую силу газов, действующую на поршень

$$F_r = (p_r - p_o) \cdot F_n$$

p_r – давление в цилиндре двигателя над поршнем;

p_o – давление в картере под поршнем;

F_n – площадь поршня.



Силы давления газов

Реализация рабочего цикла в цилиндре ДВС создает движущую силу газов, действующую на поршень

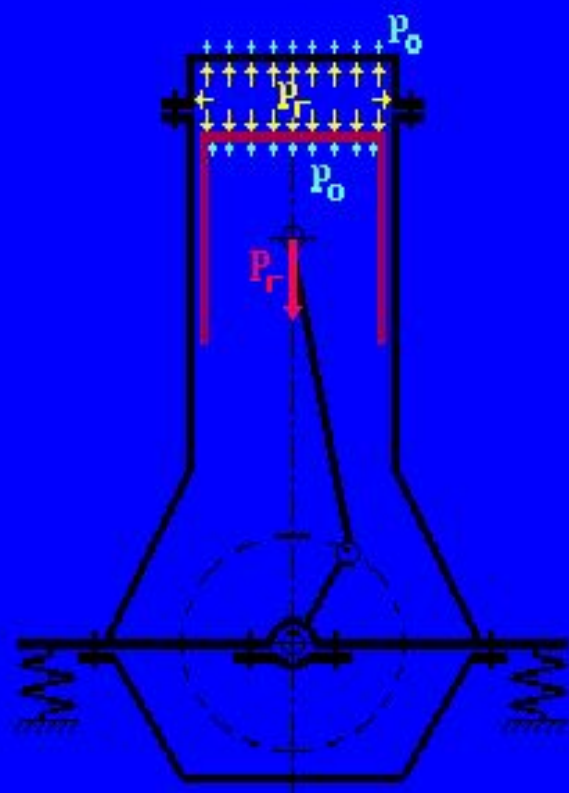
$$P_r = (p_r - p_o) \cdot F_n$$

p_r – давление в цилиндре двигателя над поршнем;

p_o – давление в картере под поршнем;

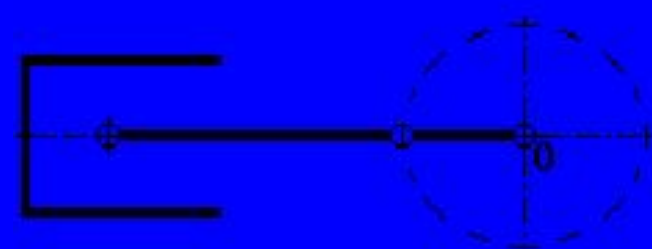
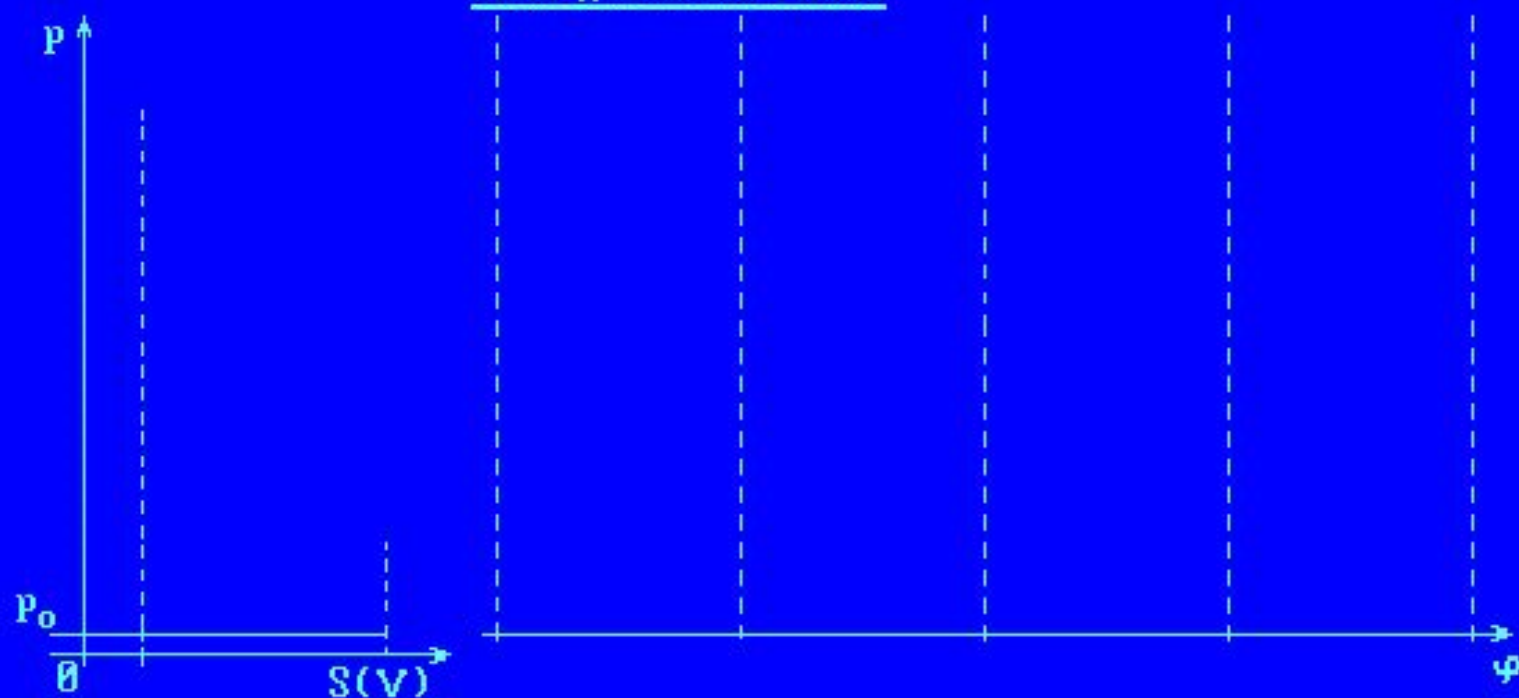
F_n – площадь поршня.

Для динамического расчета необходимо получить зависимость силы P_r от времени. Учитывая допущение о постоянстве угловой частоты вращения коленчатого вала, для динамического расчета используют зависимость P_r от угла поворота φ .



РАЗВЕРТКА ИНДИКАТОРНОЙ ДИАГРАММЫ

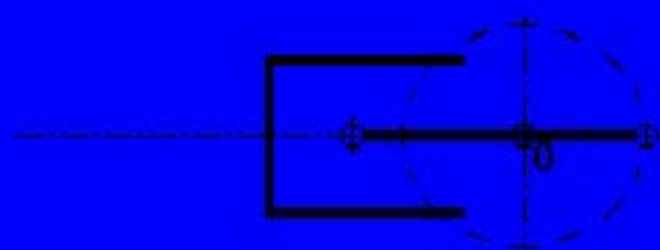
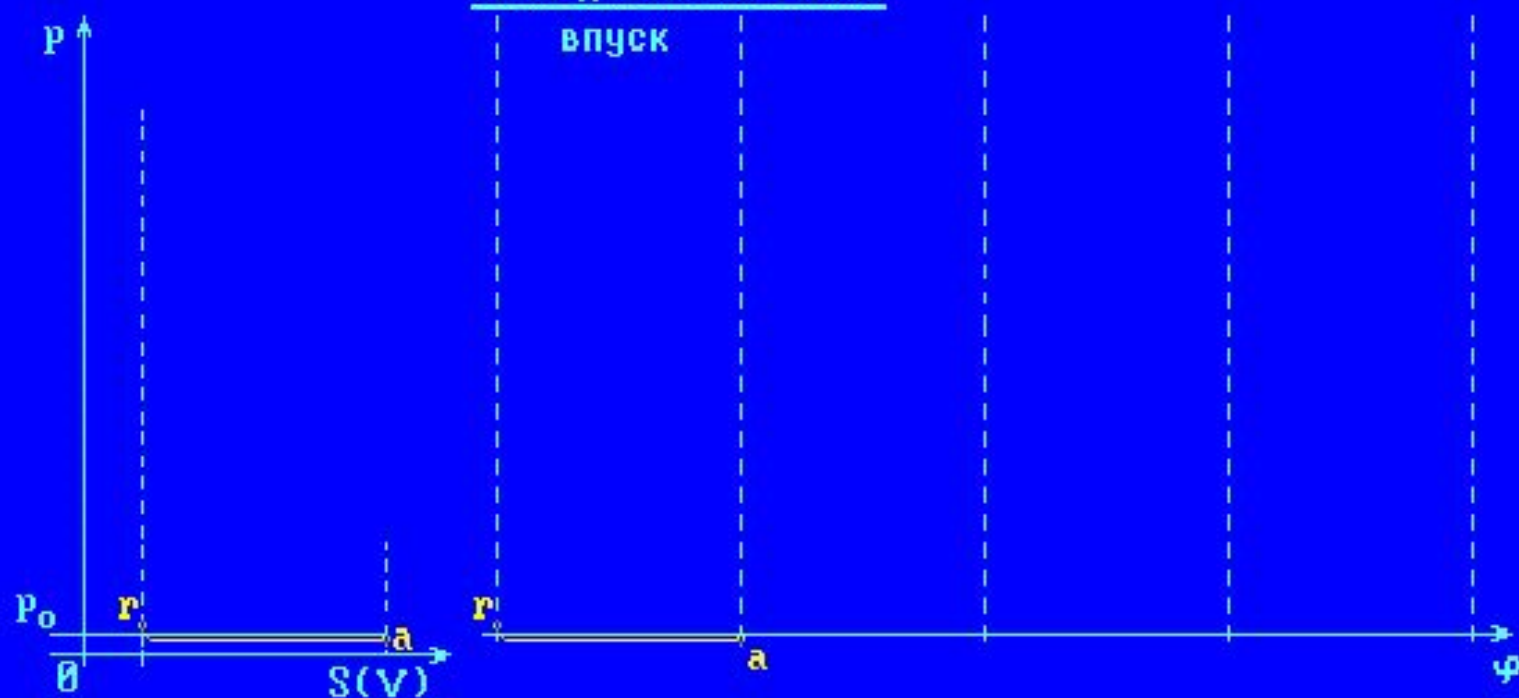
Силы давления газов



Зависимость P_r от угла поворота φ получают перестроением индикаторной диаграммы, определенной в тепловом расчете, из $p - V$ координат в $p - \varphi$, используя связь между x и φ .

$$x_{\varphi} = r[(1 - \cos \varphi) + \frac{1}{\lambda}(1 - \cos \beta)]$$

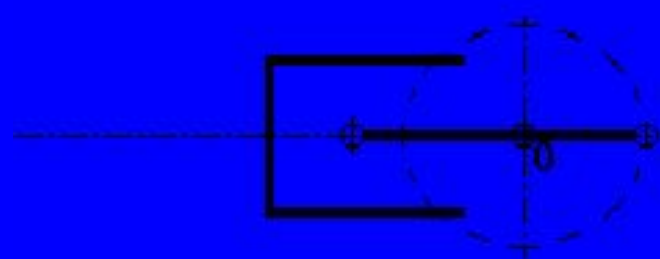
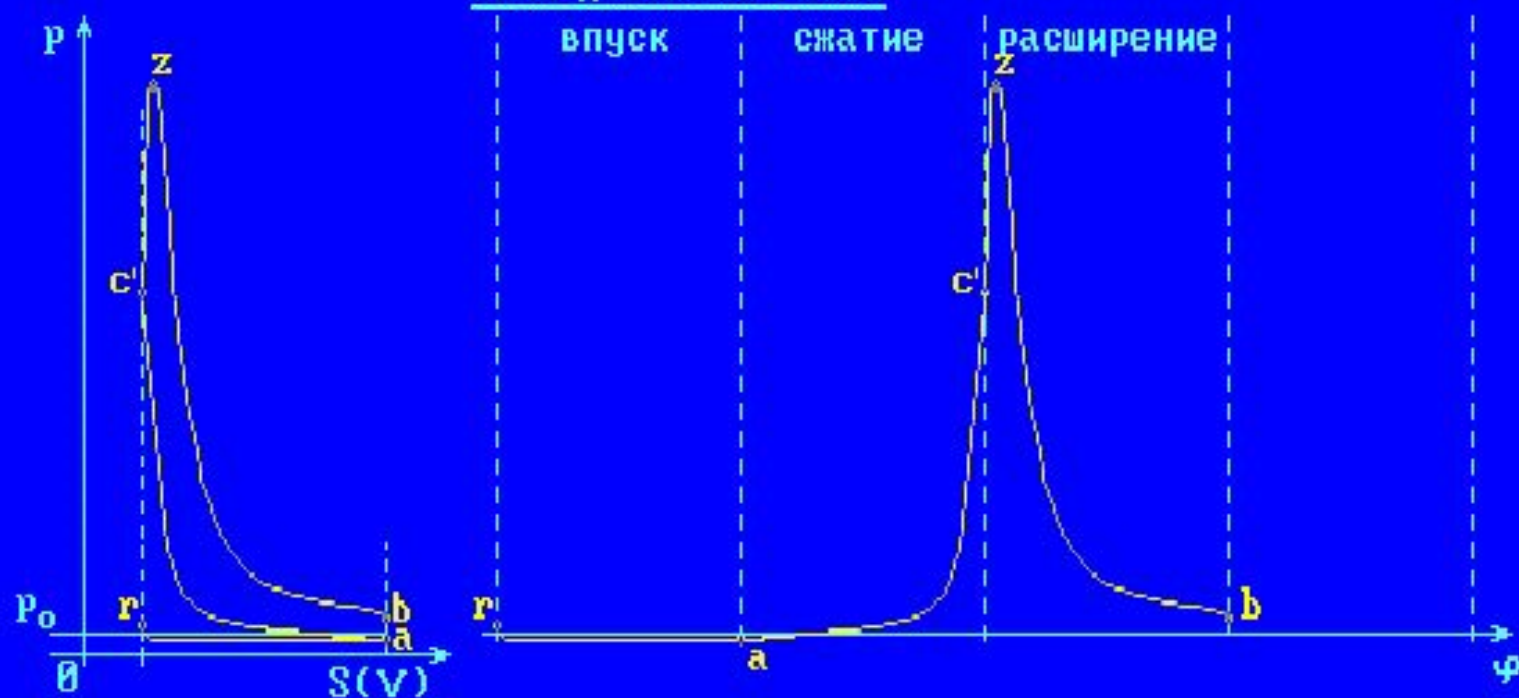
Силы давления газов



Зависимость P_r от угла поворота φ получают перестроением индикаторной диаграммы, определенной в тепловом расчете, из $p - V$ координат в $p - \varphi$, используя связь между x и φ .

$$x_{\varphi} = r[(1 - \cos \varphi) + \frac{1}{\lambda}(1 - \cos \beta)]$$

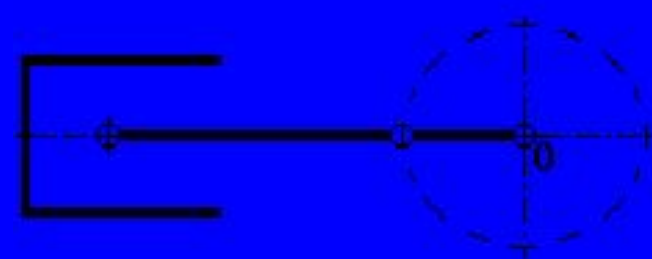
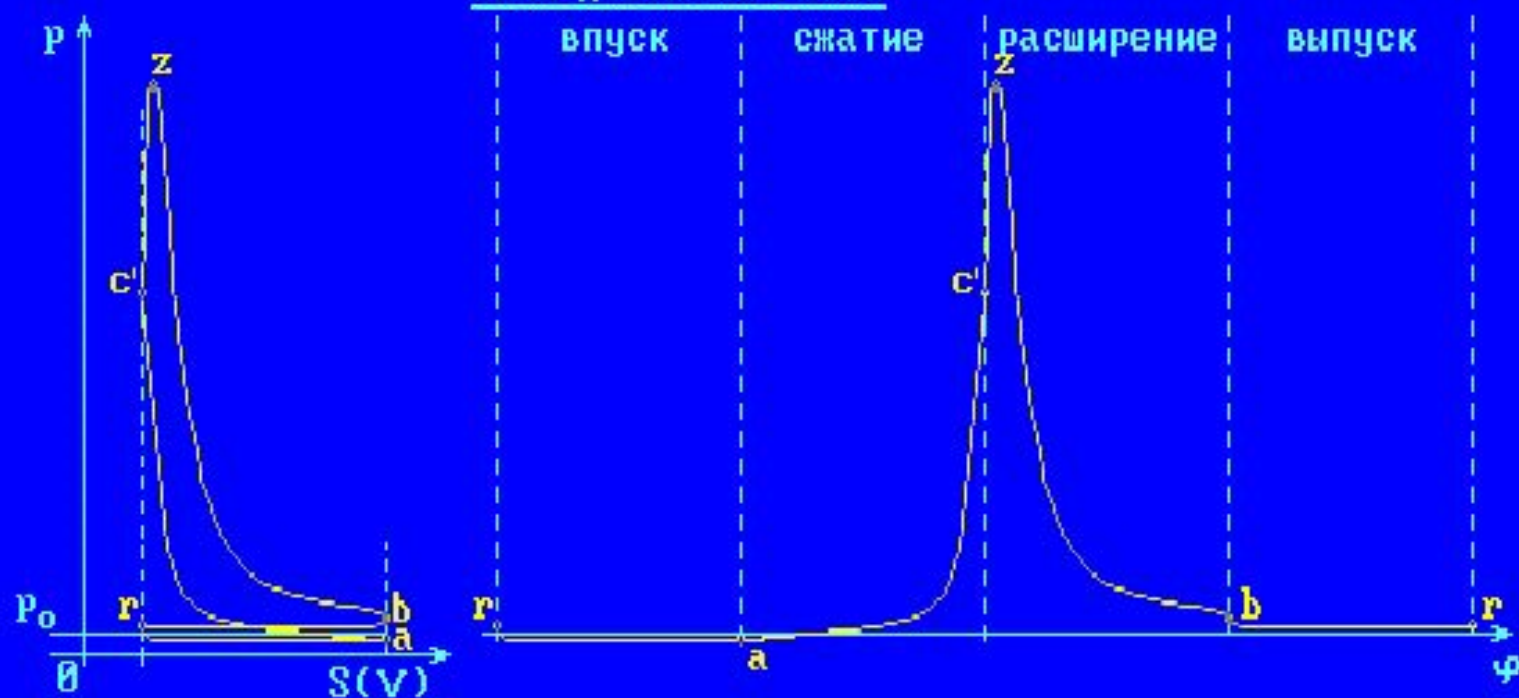
Силы давления газов



Зависимость P_r от угла поворота φ получают перестроением индикаторной диаграммы, определенной в тепловом расчете, из $p - V$ координат в $p - \varphi$, используя связь между x и φ .

$$x_{\varphi} = r \left[(1 - \cos \varphi) + \frac{1}{\lambda} (1 - \cos \beta) \right]$$

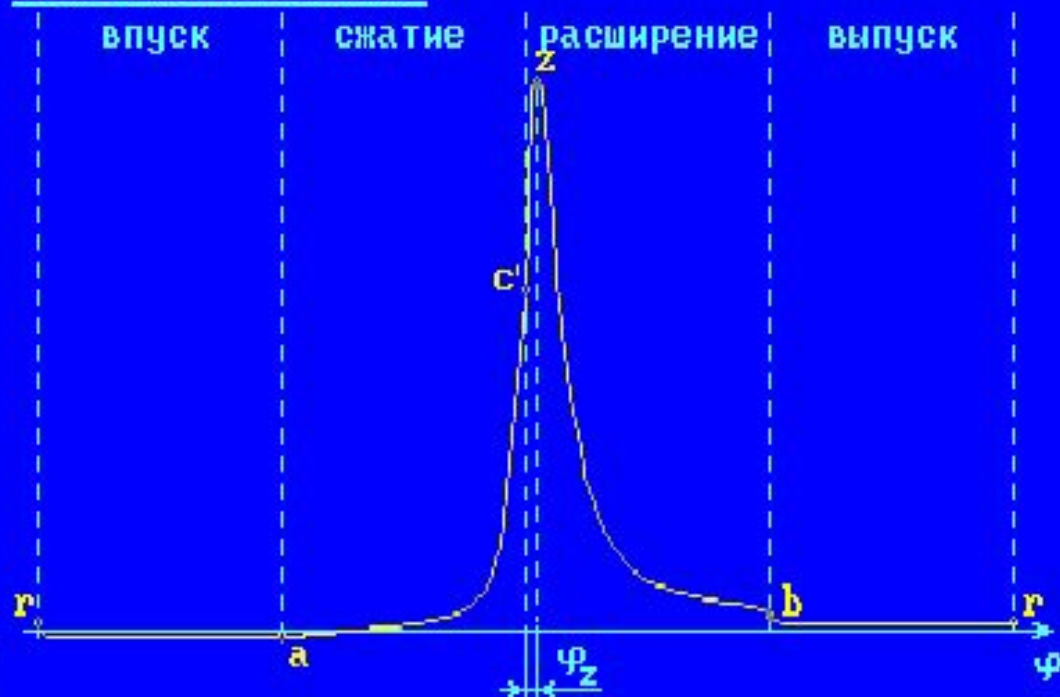
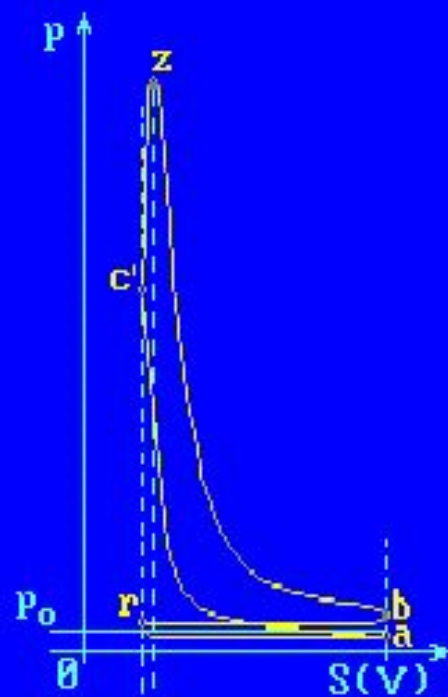
Силы давления газов



Зависимость P_r от угла поворота φ получают перестроением индикаторной диаграммы, определенной в тепловом расчете, из $p - V$ координат в $p - \varphi$, используя связь между x и φ .

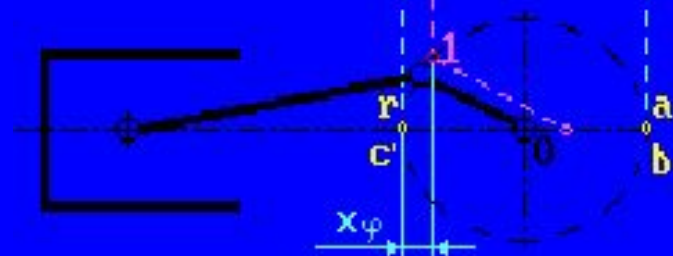
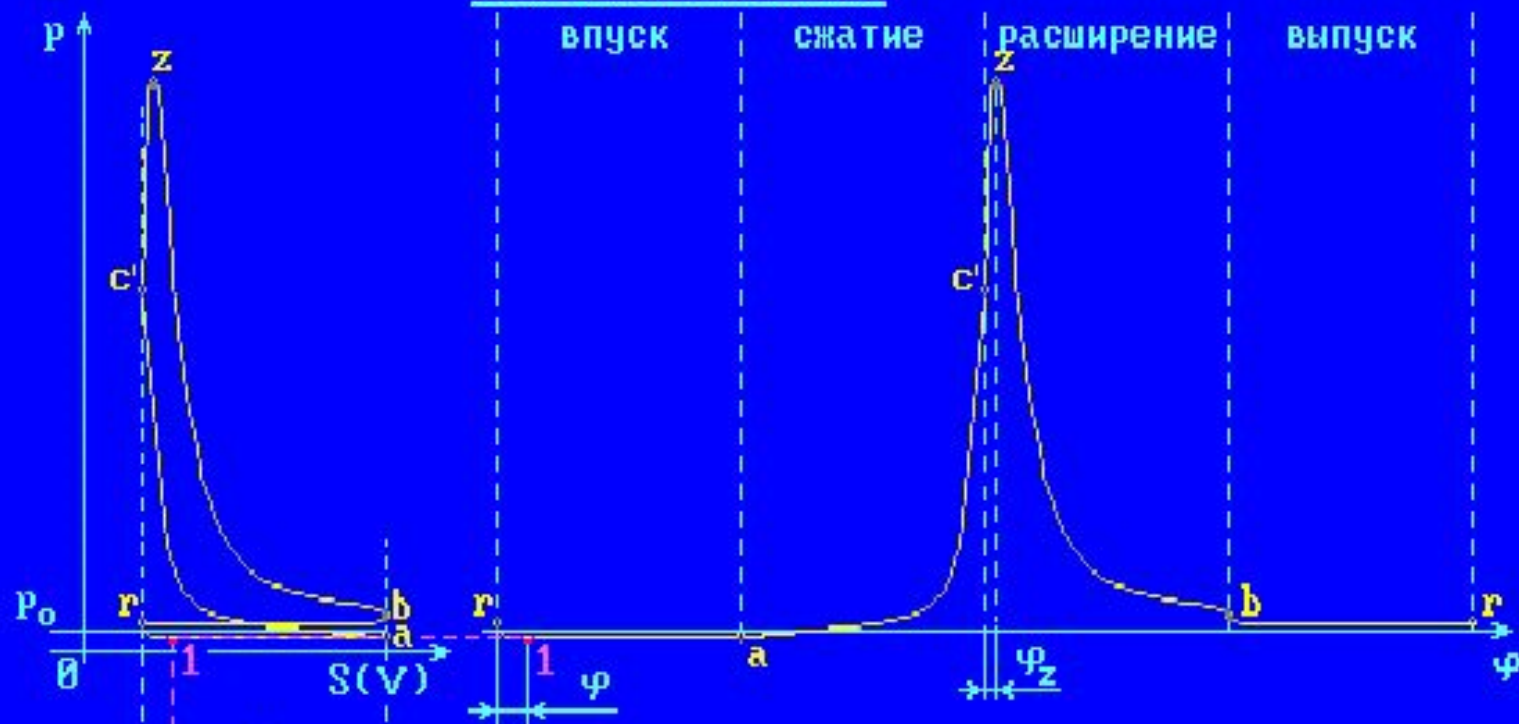
$$x_{\varphi} = r[(1 - \cos \varphi) + \frac{1}{\lambda}(1 - \cos \beta)]$$

Силы давления газов



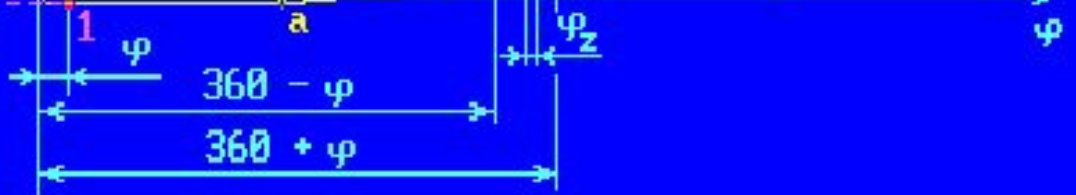
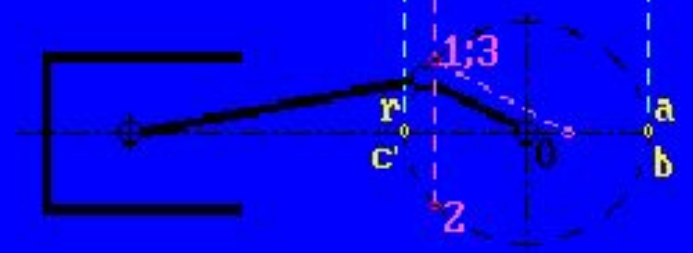
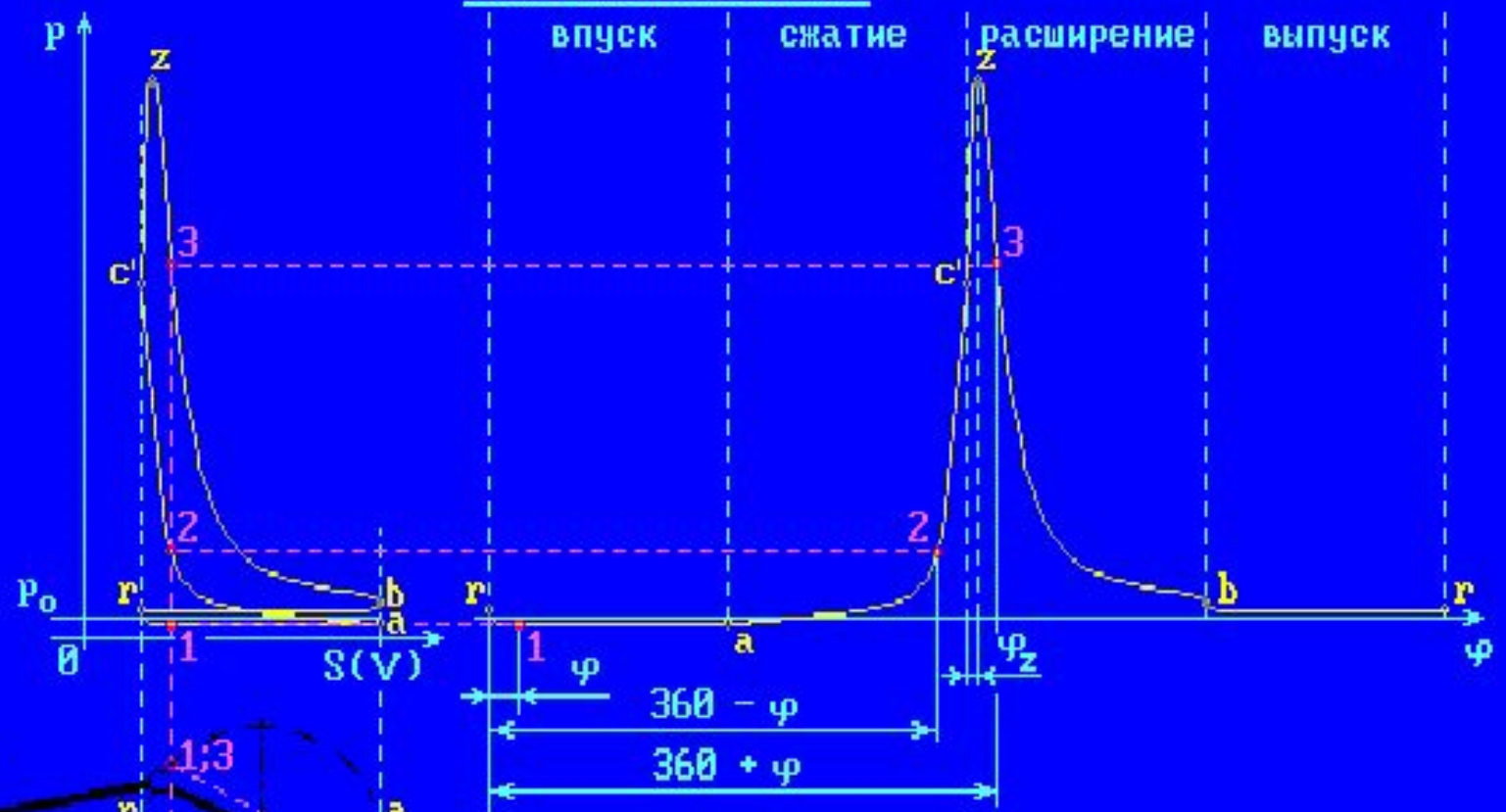
$\frac{r\lambda}{2}$ - поправка Брикса;

Силы давления газов



$\frac{r\lambda}{2}$ - поправка Брикса;
 x_φ - перемещение поршня

Силы давления газов

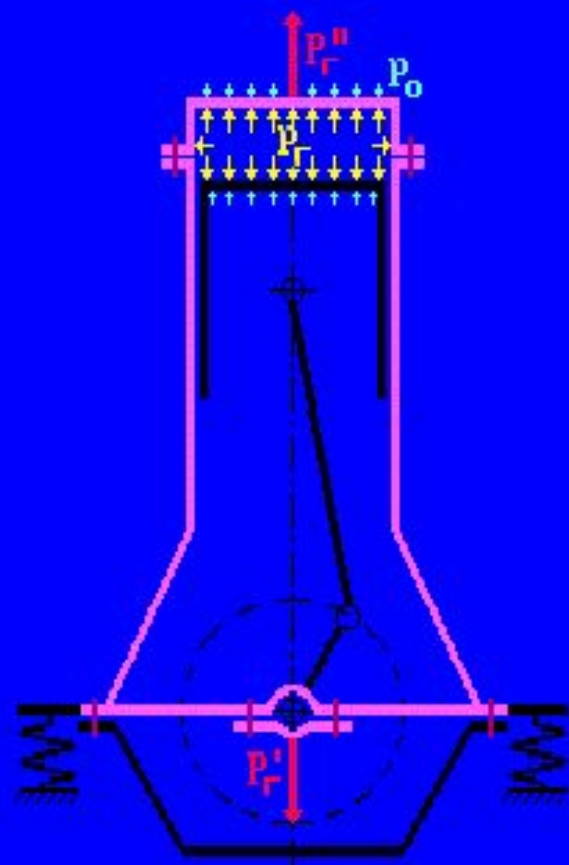


Силы давления газов



$\frac{r\lambda}{2}$ - поправка Брикаса;
 x_φ - перемещение поршня

Силы давления газов



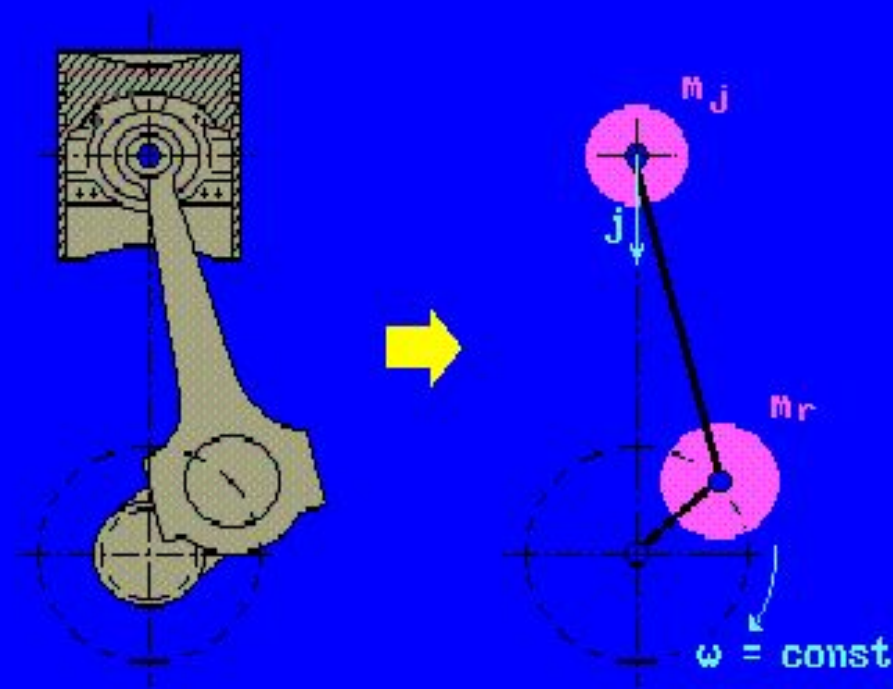
Сила газов, действующая на поршень, нагружает подвижные элементы КШМ, передается на коренные опоры коленчатого вала (P_G').

Через блок цилиндров сила газов - P_G' взаимно уравнивается силой газов - P_G'' , действующей на неподвижную головку цилиндра.

Силы газов не передаются на опоры двигателя.

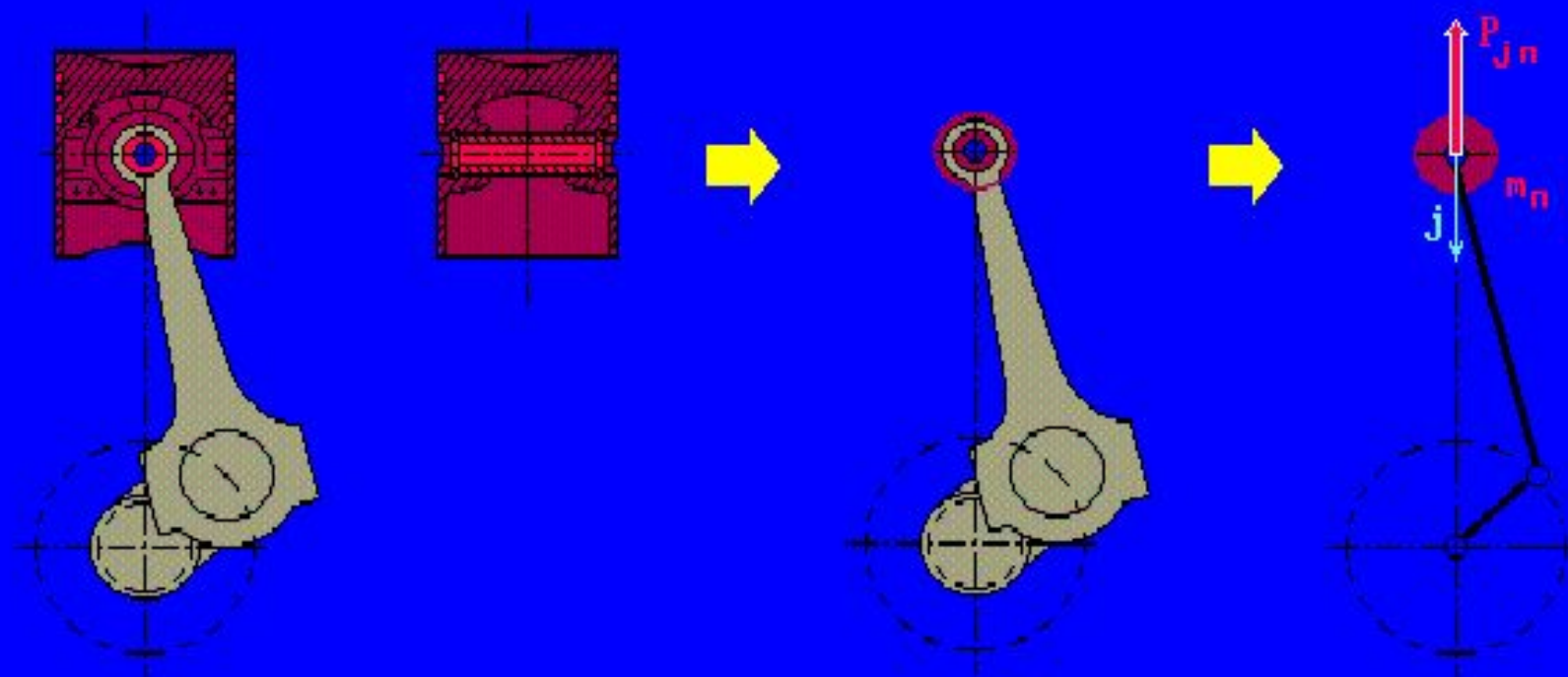
ПРИВЕДЕНИЕ КШМ К ДВУХМАССОВОЙ МОДЕЛИ

Силы инерции движущихся масс

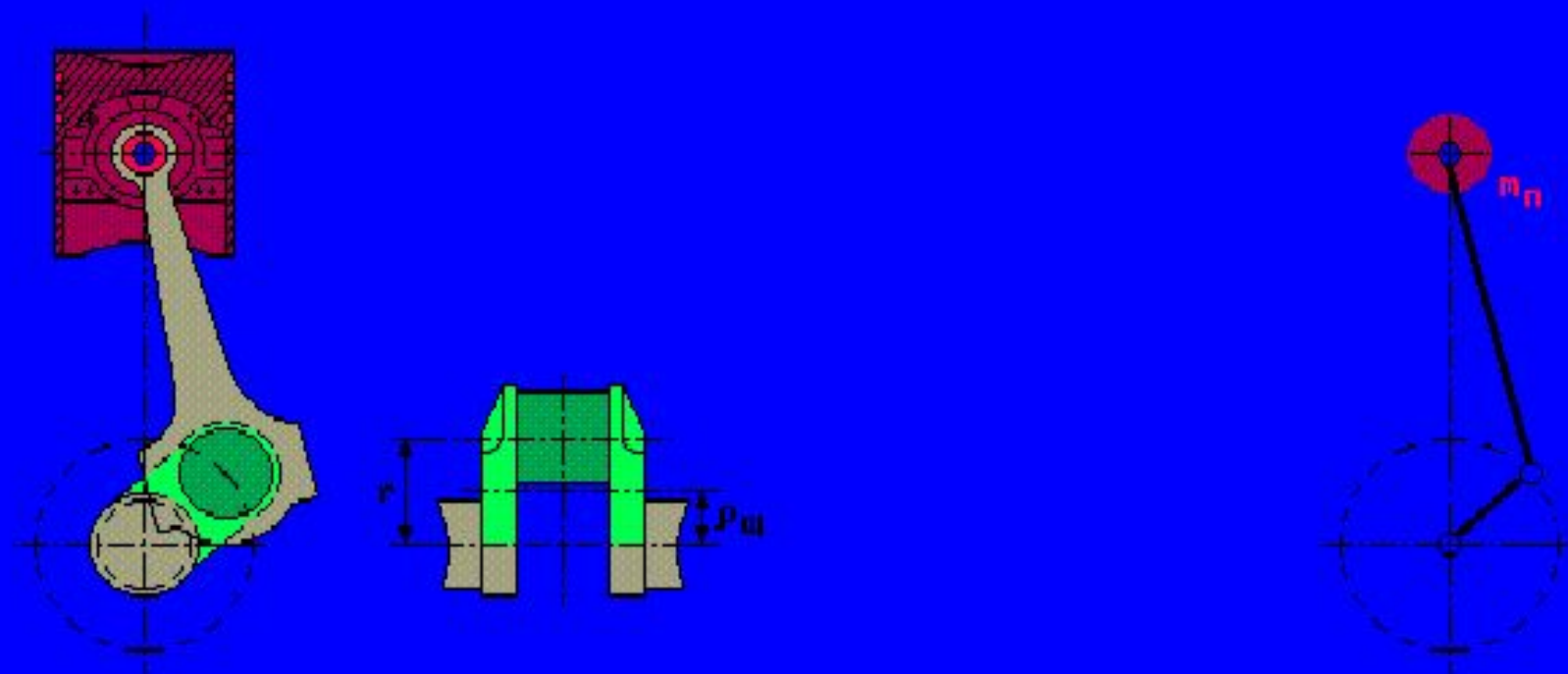


Реальный КШМ в общем случае представляет собой систему с распределенными параметрами, совершающую плоско-параллельное движение и имеющую плоскость симметрии, параллельную плоскости движения. Звенья КШМ движутся неравномерно, что вызывает в них возникновение инерционных нагрузок.

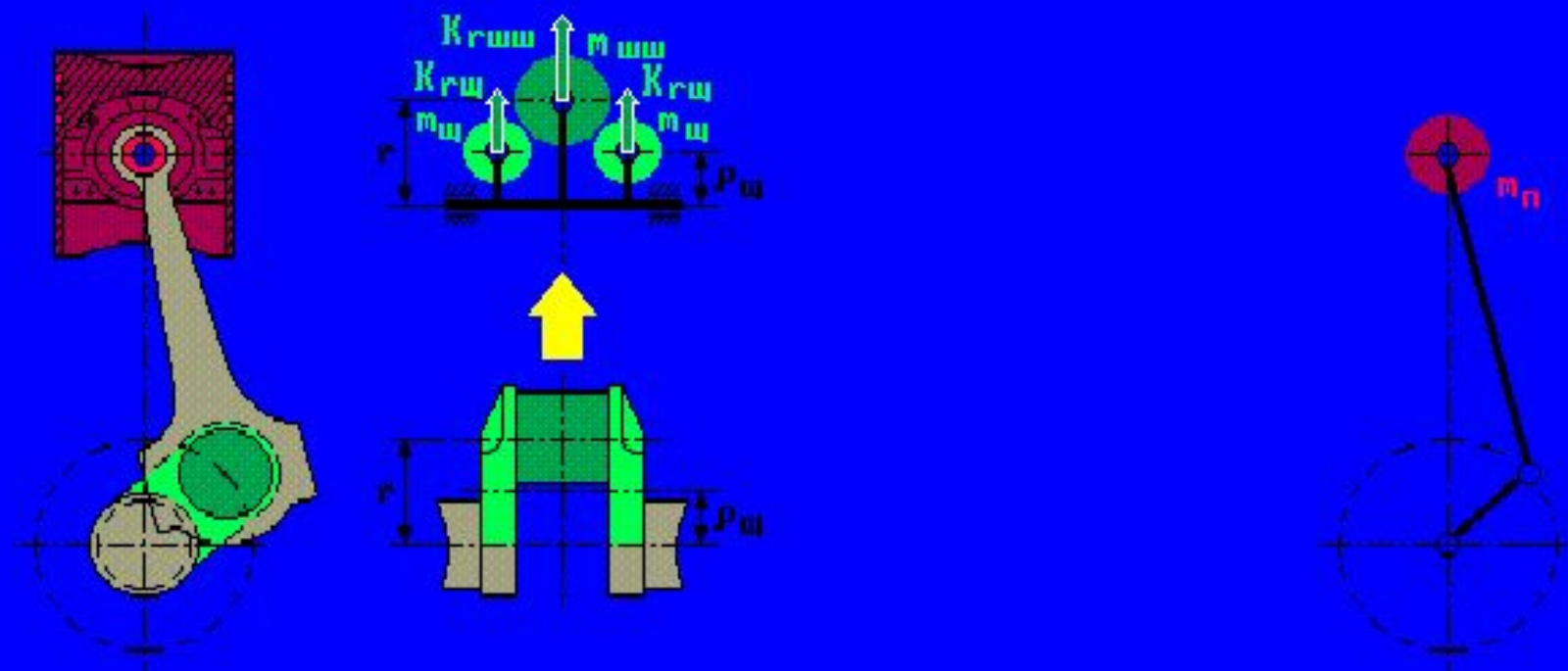
В ДВС для анализа динамики его КШМ обычно используют двухмассовую модель. Одна замещающая масса m_j сосредотачивается на оси поршневого пальца и совершает возвратно-поступательное движение с ускорением j , вторая масса m_r расположена на оси шатунной шейки и вращается равномерно.



1. Детали **поршневой группы** совершают прямолинейное возвратно-поступательное движение вдоль оси цилиндра.
2. Центр масс **поршневой группы** практически совпадает с осью поршневого пальца
3. Сила инерции поршневой группы $P_{jn} = -m_n \cdot j$

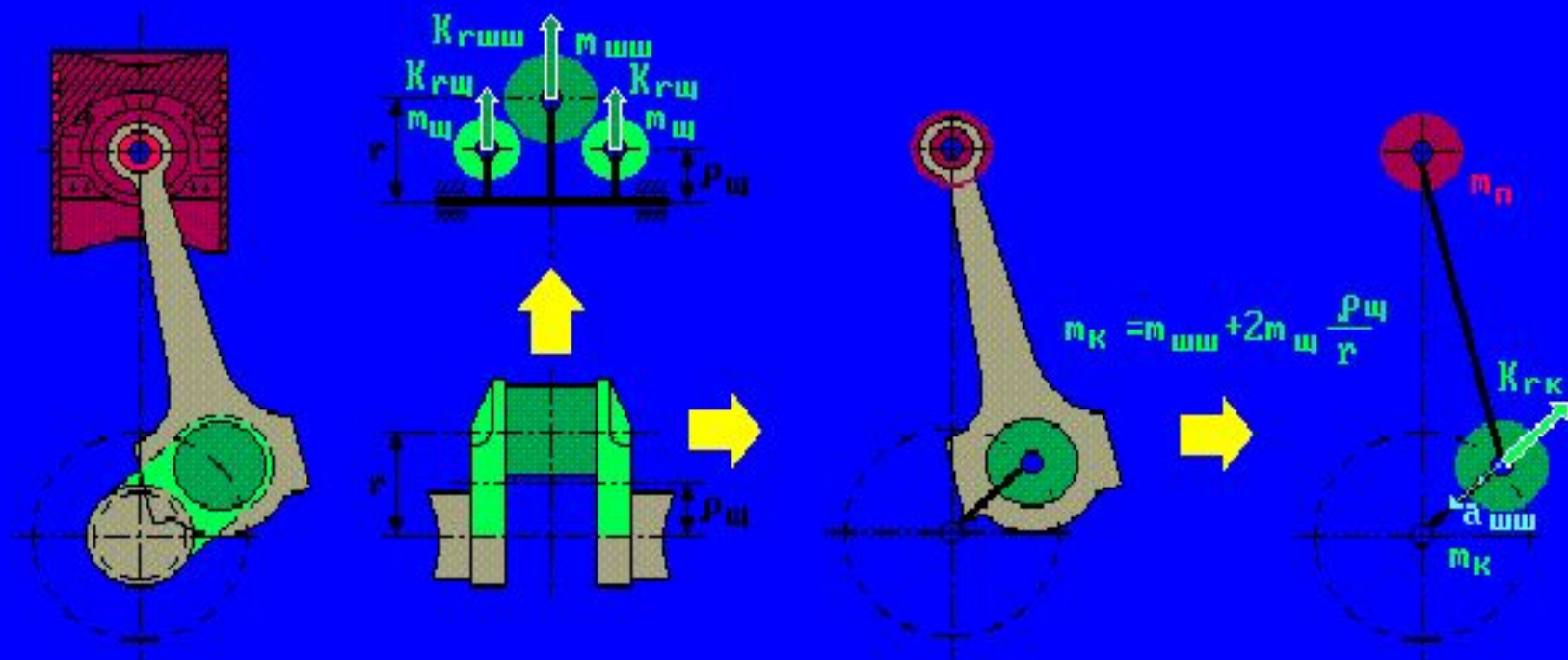


1. Кривошип коленчатого вала совершает вращательное движение.
2. Условие динамической эквивалентности выразится в виде равенства центробежных сил от вращения реальных масс элементов кривошипа ($m_{шш}, 2m_{ш}$) и соответствующей ему приведенной массы модели m_k , сосредоточенной на оси шатунной шейки.



$K_{rшш} = -m_{шш} \cdot r \cdot \omega^2$ - сила инерции шатунной шейки; $m_{шш}$ - масса шатунной шейки; центр масс шатунной шейки расположен на ее оси;

$K_{rщ} = -m_{щ} \cdot \rho_{щ} \cdot \omega^2$ - сила инерции щеки; $m_{щ}$ - масса щеки; центр масс щеки расположен на расстоянии $\rho_{щ}$ от оси коленчатого вала;

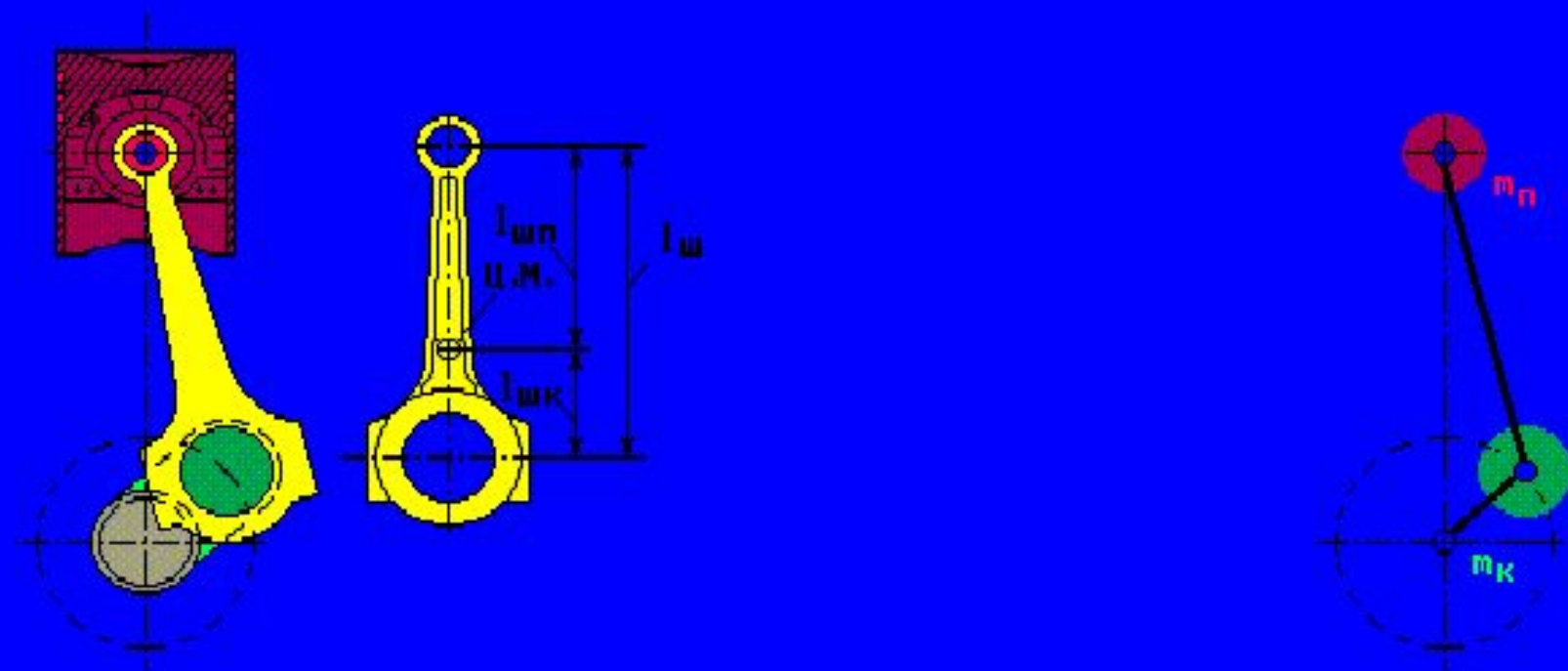


$K_{rшш} = -m_{шш} \cdot r \cdot \omega^2$ - сила инерции шатунной шейки; $m_{шш}$ - масса шатунной шейки; центр масс шатунной шейки расположен на ее оси;

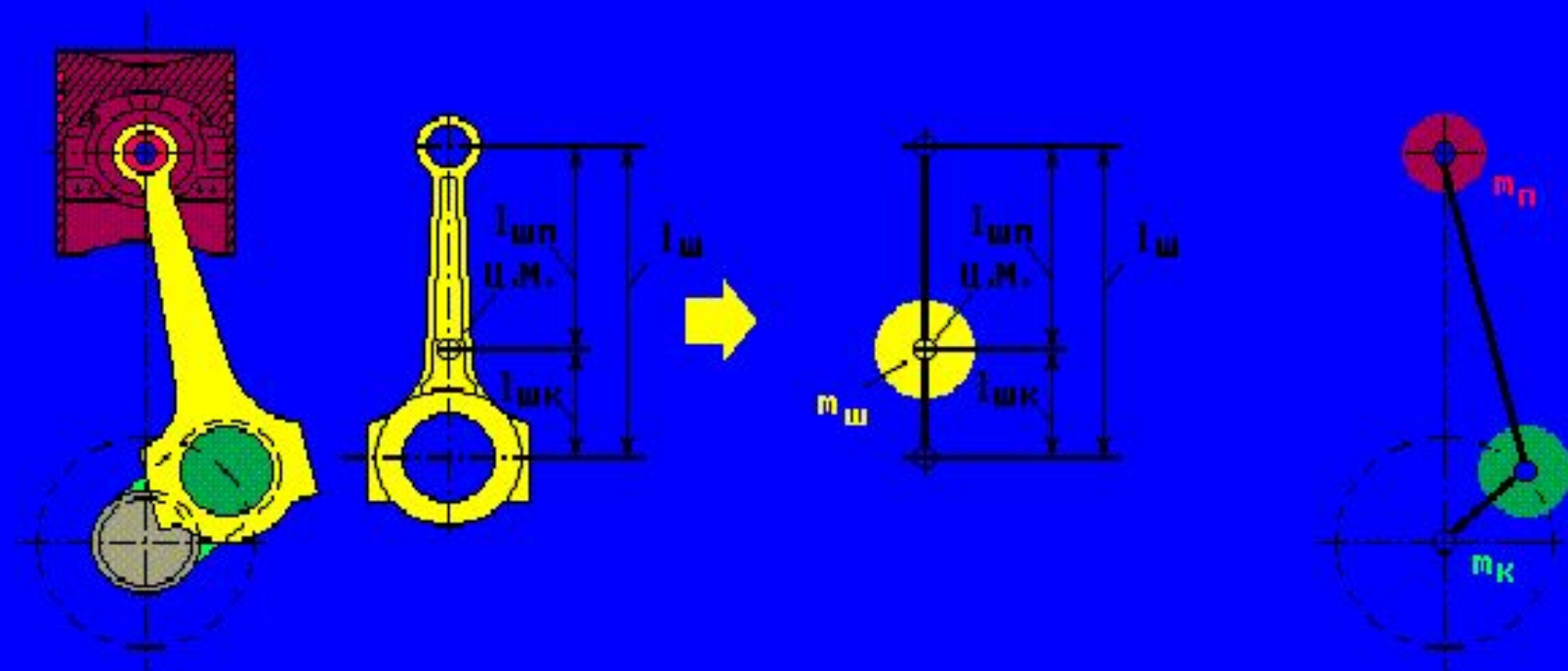
$K_{rщ} = -m_{щ} \cdot \rho_{щ} \cdot \omega^2$ - сила инерции щеки; $m_{щ}$ - масса щеки; центр масс щеки расположен на расстоянии $\rho_{щ}$ от оси коленчатого вала;

$$K_{rк} = K_{rшш} + 2K_{rщ}$$

$K_{rк} = -m_k \cdot r \cdot \omega^2$ - сила инерции приведенной массы модели m_k

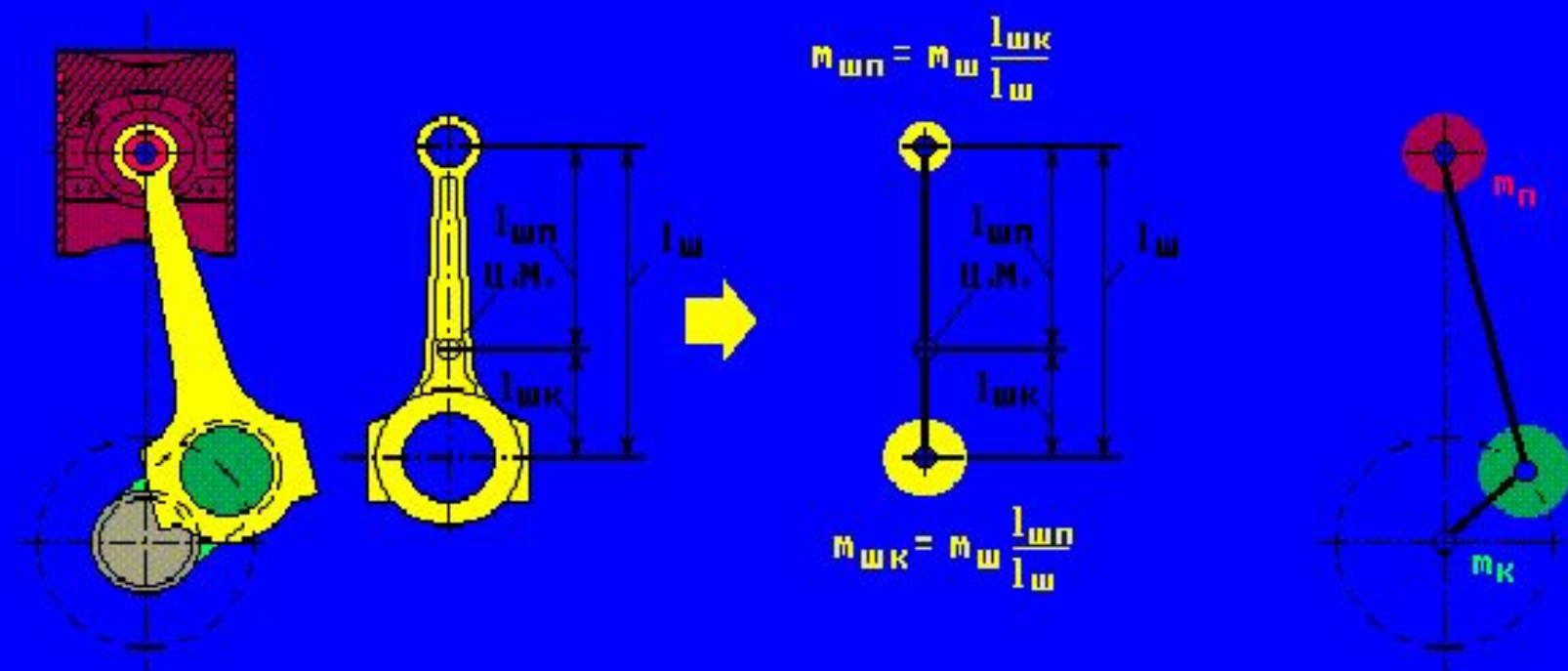


1. Элементы **шатунной группы** совершают сложное плоско-параллельное движение.
2. При использовании двухмассовой модели массу **шатунной группы** $m_{ш}$ представляют двумя замещающими массами: $m_{шп}$ – масса, приведенная к оси поршневого пальца, и $m_{шк}$ – масса, отнесенная к оси шатунной шейки коленчатого вала.



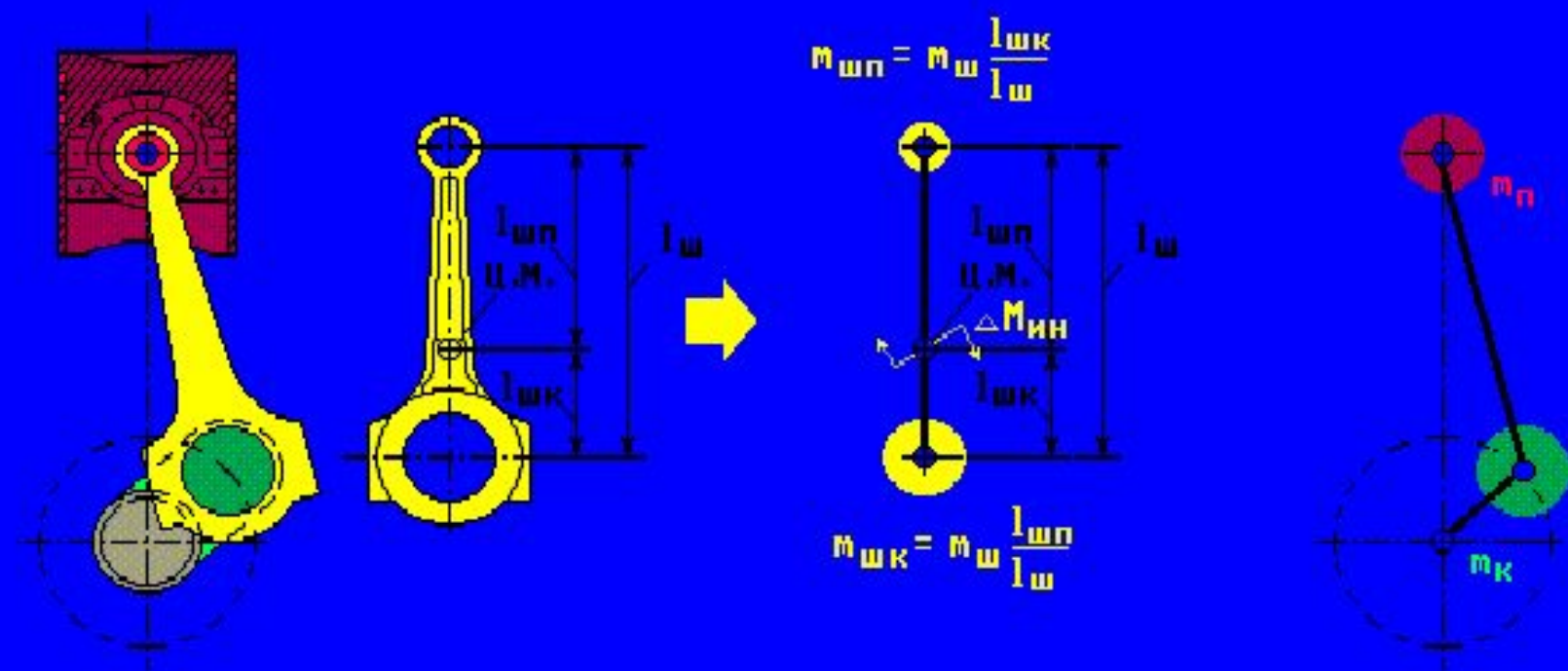
Условия эквивалентности замещающих масс

1. Сумма масс, сосредоточенных в замещающих точках модели, равна массе рассматриваемого звена КШМ. $m_{шп} + m_{шк} = m_{ш}$.



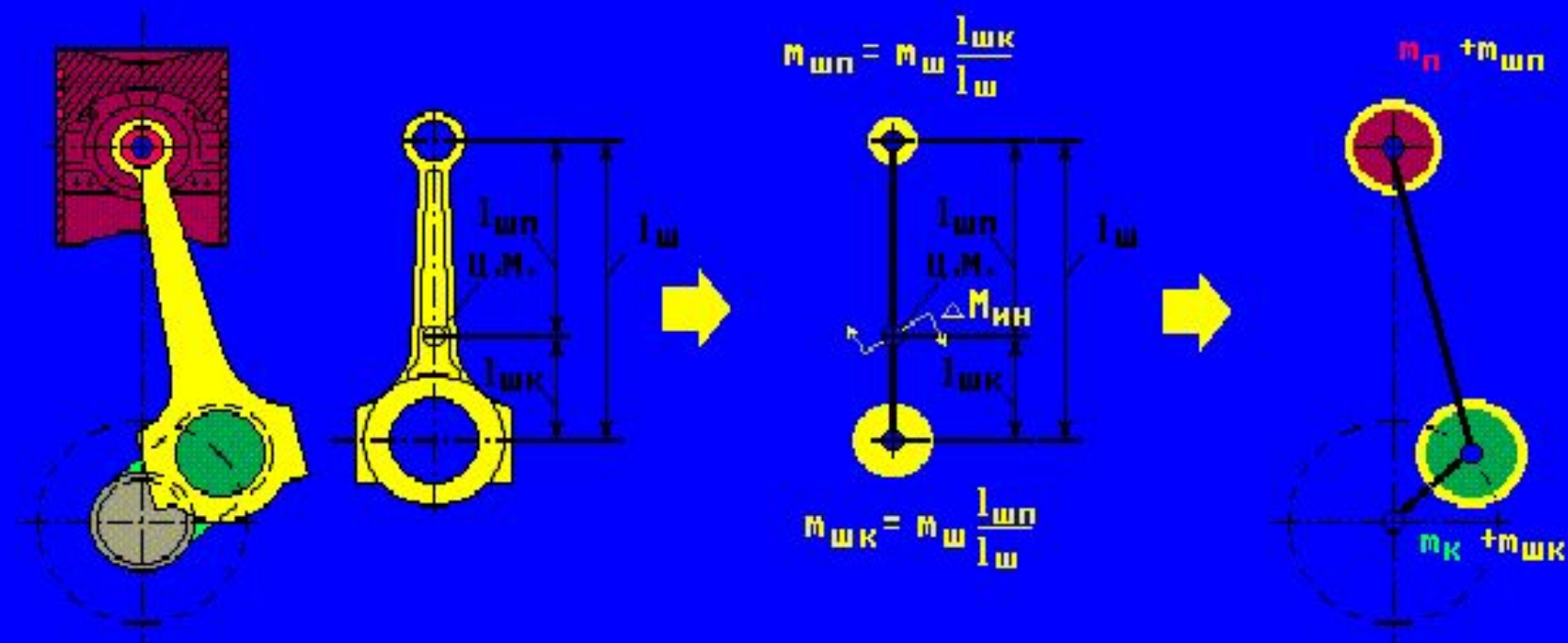
Условия эквивалентности замещающих масс

1. Сумма масс, сосредоточенных в замещающих точках модели, равна массе рассматриваемого звена КШМ. $m_{шп} + m_{шк} = m_{ш}$.
2. Положение центра масс звена реального КШМ и замещающего его в модели должно быть неизменным. $m_{шп} \cdot l_{шп} - m_{шк} \cdot l_{шк} = 0$.



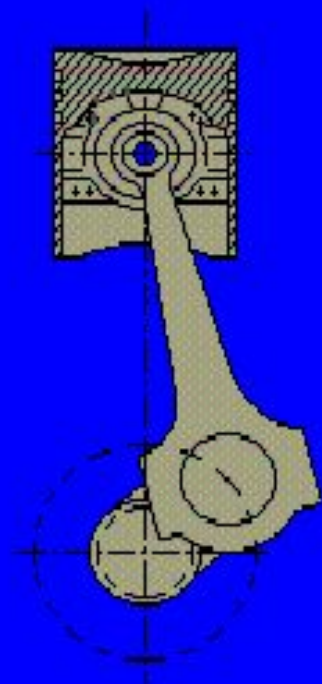
Условия эквивалентности замещающих масс

3. Сумма моментов инерции масс, расположенных в замещающих точках модели и момент инерции реального звена КШМ, относительно оси, проходящей через центр масс звена, должны быть равны. Это условие не выполняется. $\Delta M_{ин} \neq 0$, но из-за малости $\Delta M_{ин}$ для шатунов существующих ДВС анализ динамики КШМ ведут, пренебрегая этим обстоятельством.

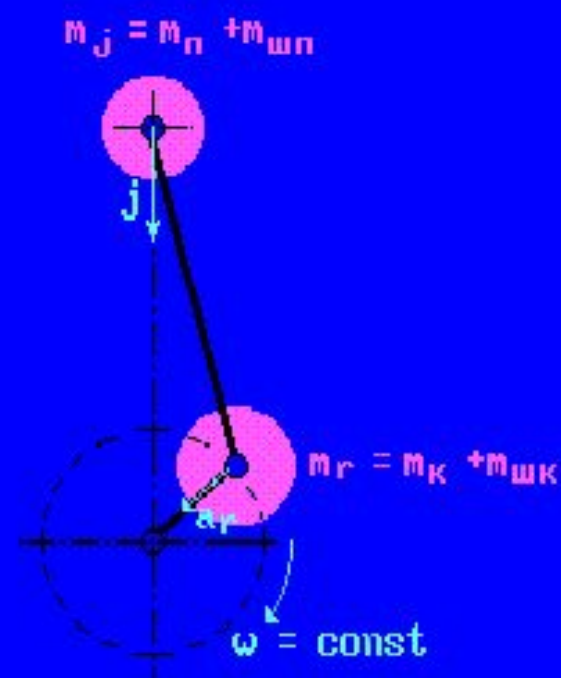


Условия эквивалентности замещающих масс

3. Сумма моментов инерции масс, расположенных в замещающих точках модели и момент инерции реального звена КШМ, относительно оси, проходящей через центр масс звена, должны быть равны. Это условие не выполняется. $\Delta M_{ин} \neq 0$, но из-за малости $\Delta M_{ин}$ для шатунов существующих ДВС анализ динамики КШМ ведут, пренебрегая этим обстоятельством.

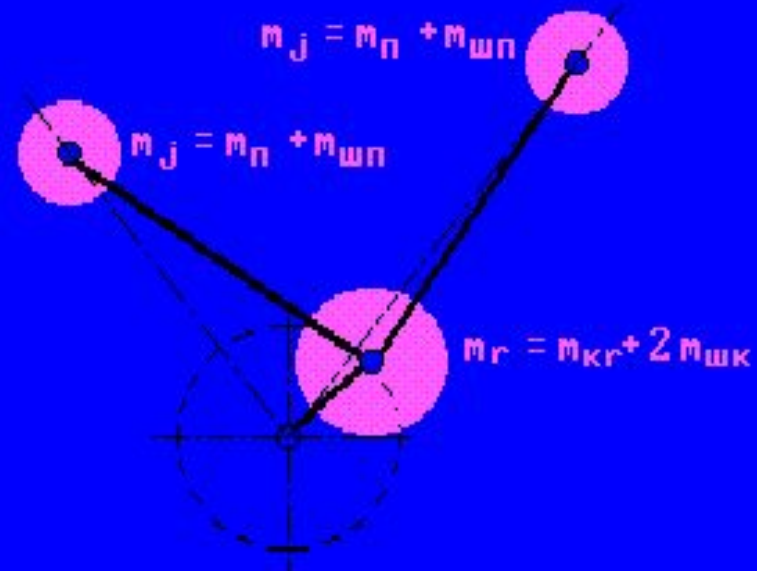
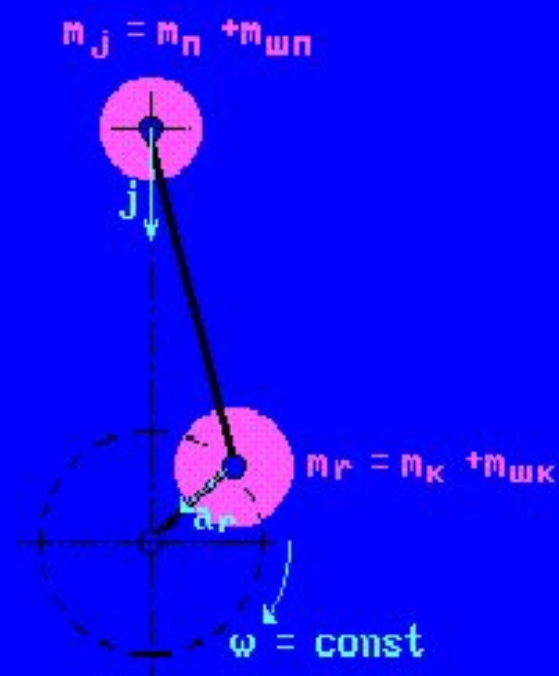


Таким образом, весь кривошипно-шатунный механизм приближенно заменяют системой двух сосредоточенных масс, связанных невесомыми звеньями.



Масса $m_j = m_n + m_{шп}$ сосредоточена на оси пальца и движется возвратно-поступательно с ускорением $j = r \cdot \omega^2 (\cos \varphi + \lambda \cos 2\varphi)$.

Масса $m_r = m_k + m_{шк}$ расположена на оси шатунной шейки, вращается равномерно и имеет центростремительное ускорение $a_r = r \cdot \omega^2$.

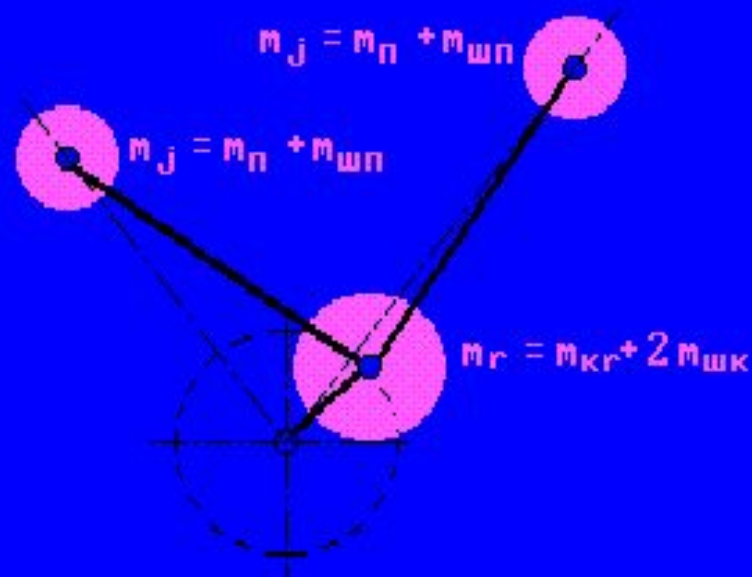
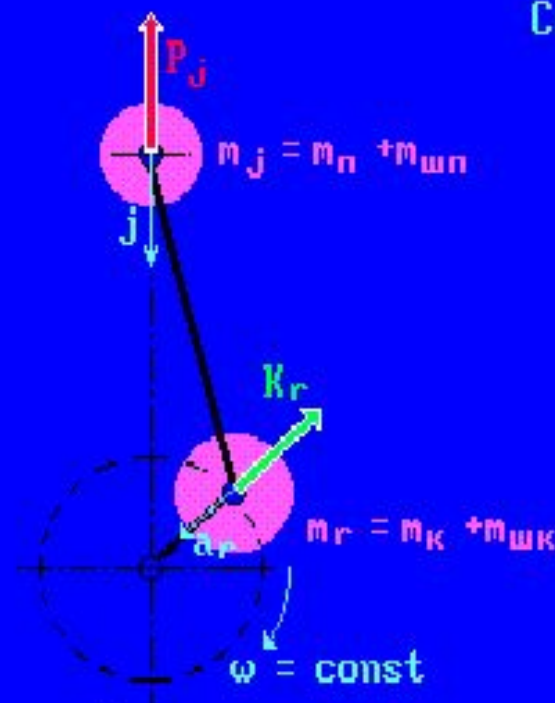


Масса $m_j = m_n + m_{шп}$ сосредоточена на оси пальца и движется возвратно-поступательно с ускорением $j = r \cdot \omega^2 (\cos \varphi + \lambda \cos 2\varphi)$.

Масса $m_r = m_{кр} + m_{шк}$ расположена на оси шатунной шейки, вращается равномерно и имеет центростремительное ускорение $a_r = r \cdot \omega^2$.

Для V-образных ДВС с двумя шатунами, расположенными на одной шатунной шейке коленчатого вала $m_r = m_{кр} + 2m_{шк}$.

Силы инерции КШМ



Масса $m_j = m_n + m_{шп}$ сосредоточена на оси пальца и движется возвратно-поступательно с ускорением $j = r \cdot \omega^2 (\cos \varphi + \lambda \cos 2\varphi)$.

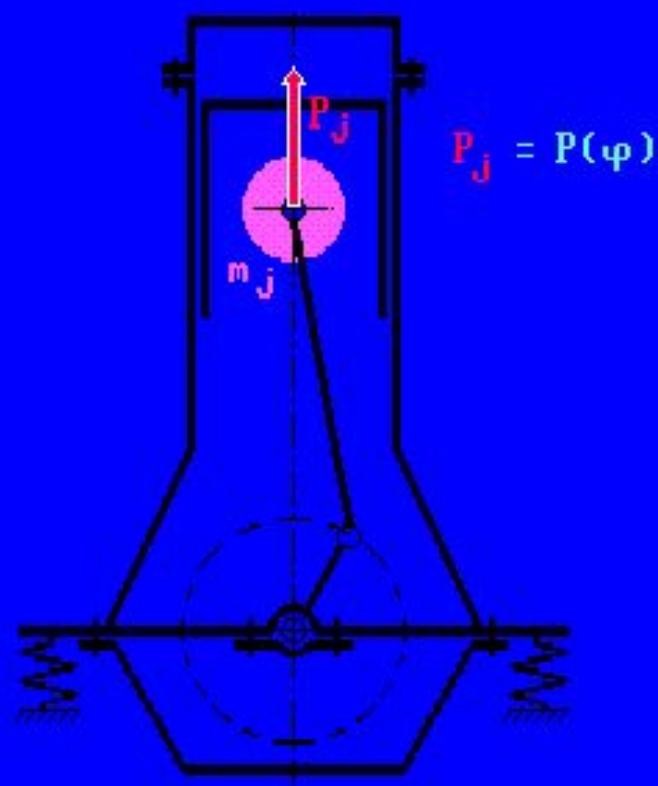
Масса $m_r = m_{кр} + m_{шк}$ расположена на оси шатунной шейки, вращается равномерно и имеет центростремительное ускорение $a_r = r \cdot \omega^2$.

Сила инерции от возвратно-поступательно движущихся масс $P_j = -j \cdot m_j$.
Центробежная сила инерции от вращающихся масс $K_r = -a_r \cdot m_r$.

СИЛЫ И МОМЕНТЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ В КШМ

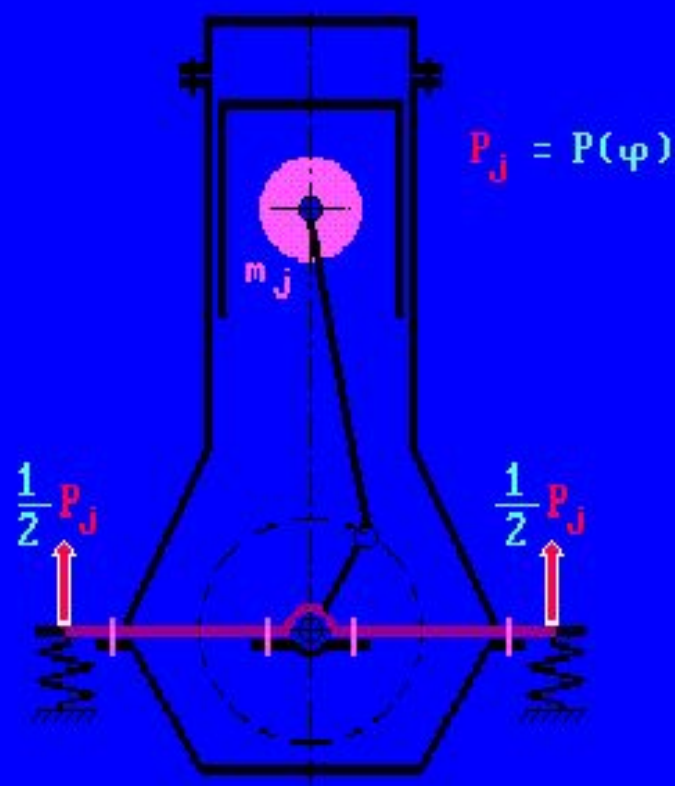
Анализ динамики центрального КШМ

Сила инерции от возвратно-поступательно движущихся масс P_j является свободной силой. Передается через подвижные элементы КШМ, коренные подшипники и картер на опоры ДВС. Переменна по величине и направлению (знаку) и может вызвать внешнюю неуравновешенность двигателя.

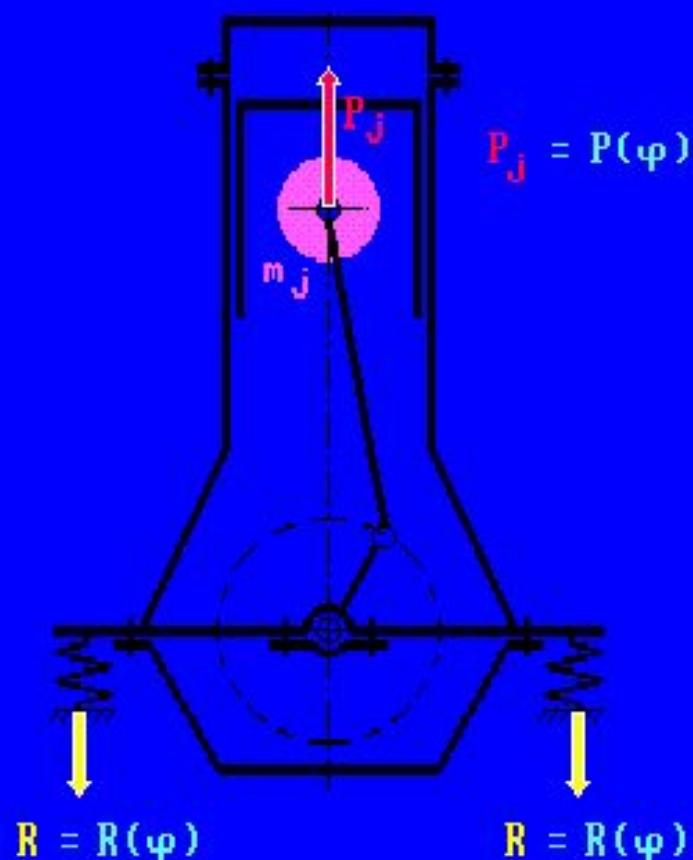


Анализ динамики центрального КШМ

Сила инерции от возвратно-поступательно движущихся масс P_j является свободной силой. Передается через подвижные элементы КШМ, коренные подшипники и картер на опоры ДВС. Переменна по величине и направлению (знаку) и может вызвать внешнюю неуравновешенность двигателя. Необходимы специальные мероприятия по ее уравновешиванию внутри ДВС.



Анализ динамики центрального КШМ



Сила инерции от возвратно-поступательно движущихся масс P_j является свободной силой. Передается через подвижные элементы КШМ, коренные подшипники и картер на опоры ДВС. Переменна по величине и направлению (знаку) и может вызвать внешнюю неуравновешенность двигателя.

Необходимы специальные мероприятия по ее уравновешиванию внутри ДВС.

С учетом приближенной зависимости ускорения (j) от угла поворота кривошипа (φ) сила P_j обычно представляется в виде суммы сил инерции первого (P_{jI}) и второго (P_{jII}) порядка.

$$P_j = -m_j \cdot r \cdot \omega^2 (\cos \varphi + \lambda \cos 2\varphi) =$$

$$= C \cos \varphi + \lambda C \cos 2\varphi = P_{jI} + P_{jII}$$

$$C = -m_j \cdot r \cdot \omega^2$$

Характер изменения P_j определяется ускорением поршня (j).

Анализ динамики центрального КШМ

Сила инерции от возвратно-поступательно движущихся масс P_j является свободной силой. Передается через подвижные элементы КШМ, коренные подшипники и картер на опоры ДВС. Переменна по величине и направлению (знаку) и может вызвать внешнюю неуравновешенность двигателя.

Необходимы специальные мероприятия по ее уравновешиванию внутри ДВС.

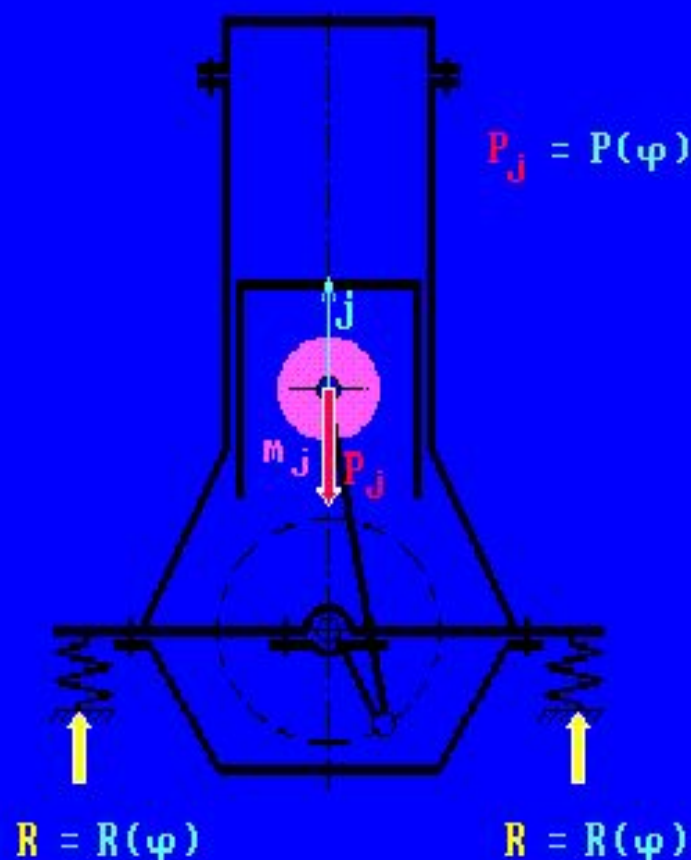
С учетом приближенной зависимости ускорения (j) от угла поворота кривошипа (φ) сила P_j обычно представляется в виде суммы сил инерции первого (P_{jI}) и второго (P_{jII}) порядка.

$$P_j = -m_j \cdot r \cdot \omega^2 (\cos \varphi + \lambda \cos 2\varphi) =$$

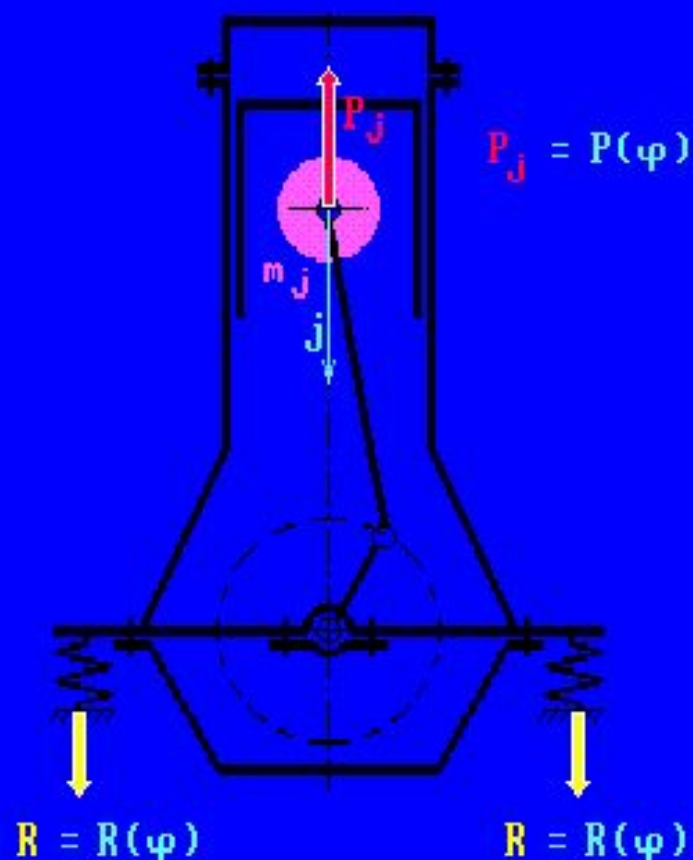
$$= C \cos \varphi + \lambda C \cos 2\varphi = P_{jI} + P_{jII}$$

$$C = -m_j \cdot r \cdot \omega^2$$

Характер изменения P_j определяется ускорением поршня (j).



Анализ динамики центрального КШМ



Сила инерции от возвратно-поступательно движущихся масс P_j является свободной силой. Передается через подвижные элементы КШМ, коренные подшипники и картер на опоры ДВС. Переменна по величине и направлению (знаку) и может вызвать внешнюю неуравновешенность двигателя.

Необходимы специальные мероприятия по ее уравниванию внутри ДВС.

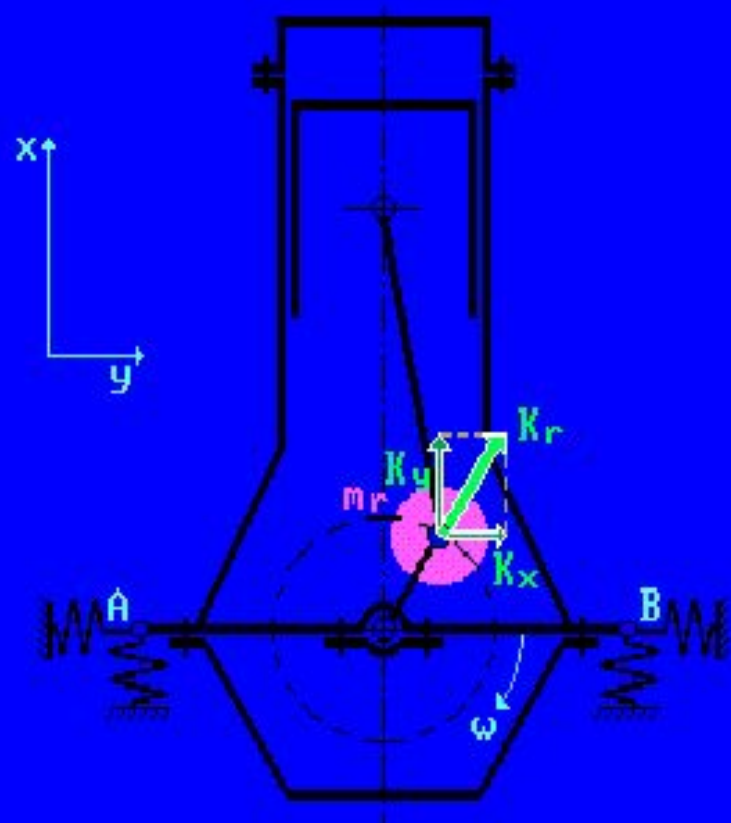
С учетом приближенной зависимости ускорения (j) от угла поворота кривошипа (φ) сила P_j обычно представляется в виде суммы сил инерции первого (P_{j1}) и второго (P_{j2}) порядка.

$$P_j = -m_j \cdot r \cdot \omega^2 (\cos \varphi + \lambda \cos 2\varphi) =$$

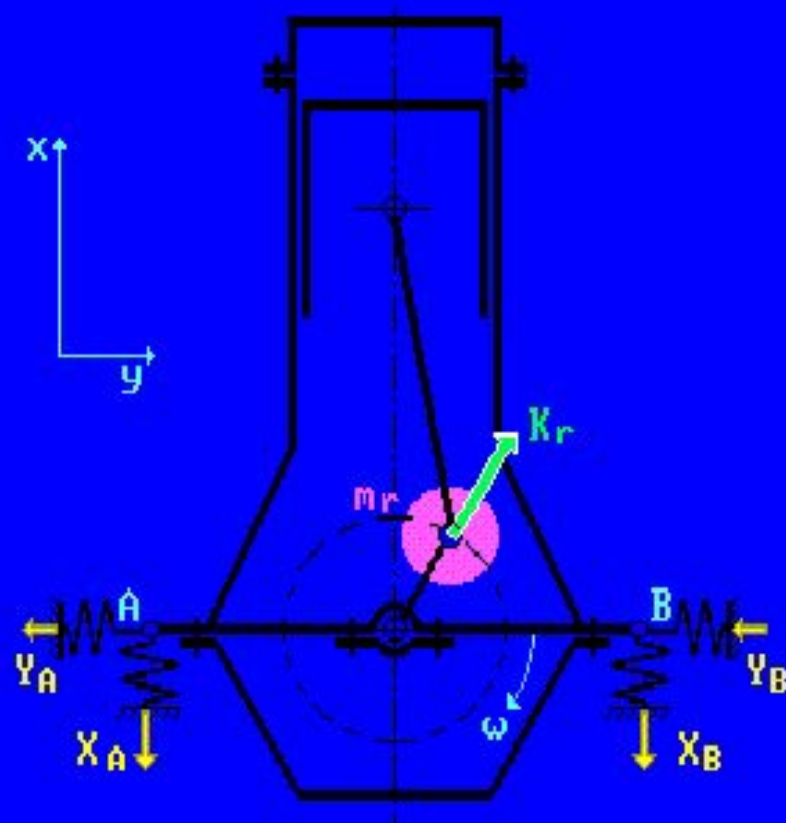
$$= C \cos \varphi + \lambda C \cos 2\varphi = P_{j1} + P_{j2}$$

$$C = -m_j \cdot r \cdot \omega^2$$

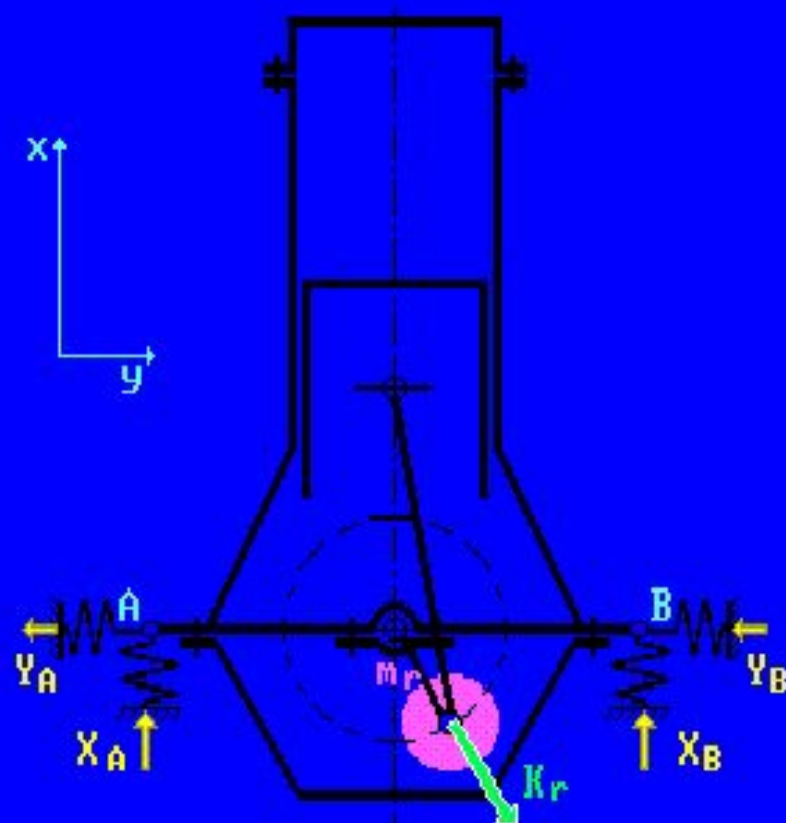
Характер изменения P_j определяется ускорением поршня (j).



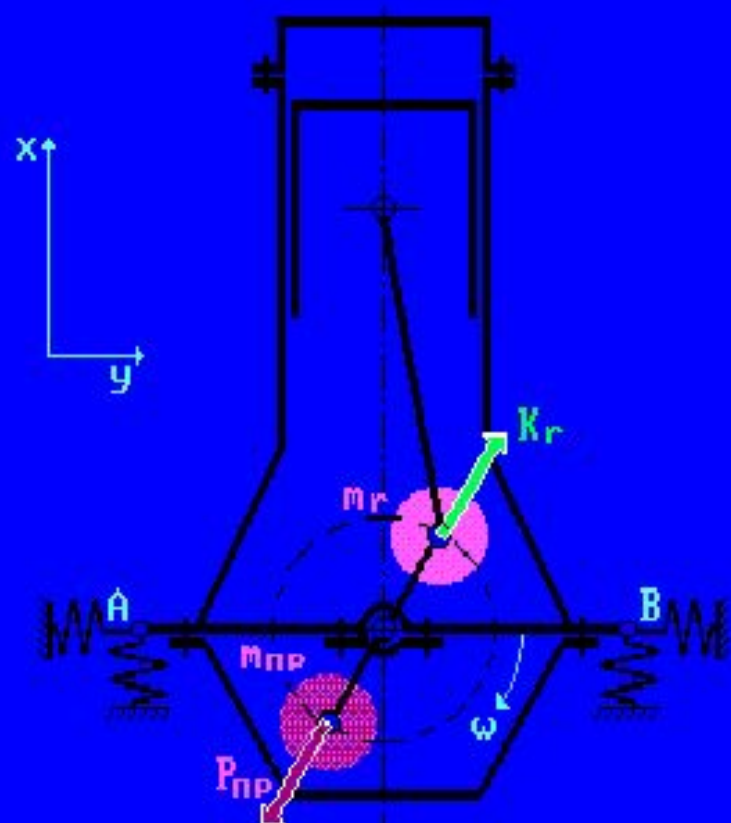
Центробежная сила инерции от вращающихся масс кривошипно-шатунного механизма K_r представляет собой постоянный по величине вектор, направленный по радиусу кривошипа и вращающийся с постоянной угловой частотой ω . Воздействуя на опоры двигателя через картер, сила K_r передается на опоры двигателя, вызывая его неуравновешенность.



Центробежная сила инерции от вращающихся масс кривошипно-шатунного механизма K_r представляет собой постоянный по величине вектор, направленный по радиусу кривошипа и вращающийся с постоянной угловой частотой ω . Воздействуя на опоры двигателя через картер, сила K_r передается на опоры двигателя, вызывая его неуравновешенность.



Центробежная сила инерции от вращающихся масс кривошипно-шатунного механизма K_r представляет собой постоянный по величине вектор, направленный по радиусу кривошипа и вращающийся с постоянной угловой частотой ω . Воздействуя на опоры двигателя через картер, сила K_r передается на опоры двигателя, вызывая его неуравновешенность.



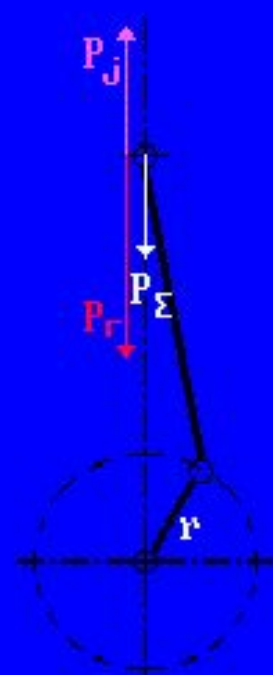
Центробежная сила инерции от вращающихся масс кривошипно-шатунного механизма K_r представляет собой постоянный по величине вектор, направленный по радиусу кривошипа и вращающийся с постоянной угловой частотой ω . Воздействуя на опоры двигателя через картер, сила K_r передается на опоры двигателя, вызывая его неуравновешенность.

Установка противовесов – один из способов устранения данной проблемы.

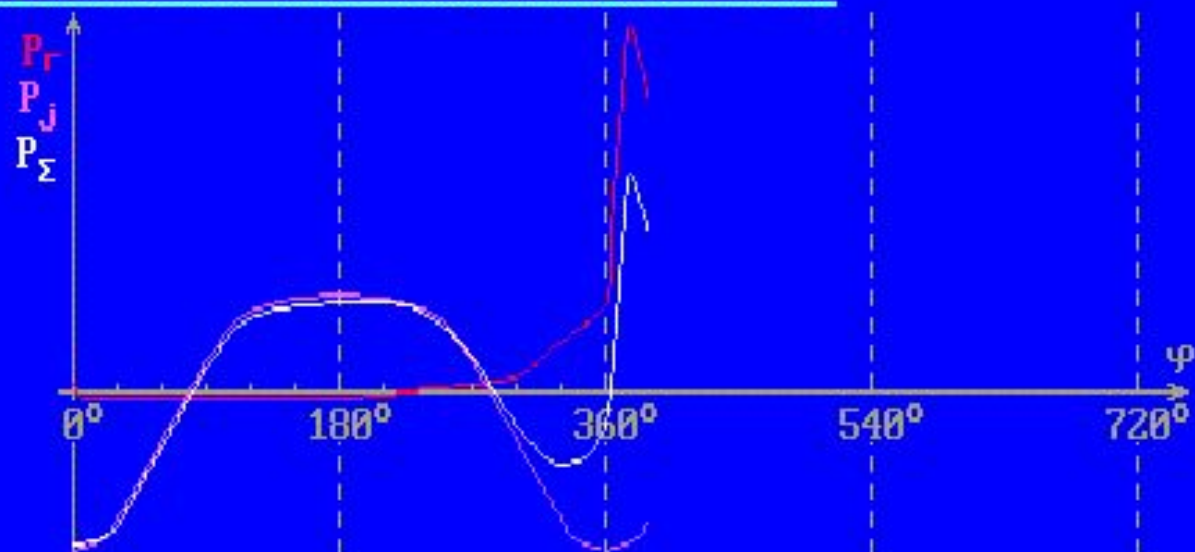
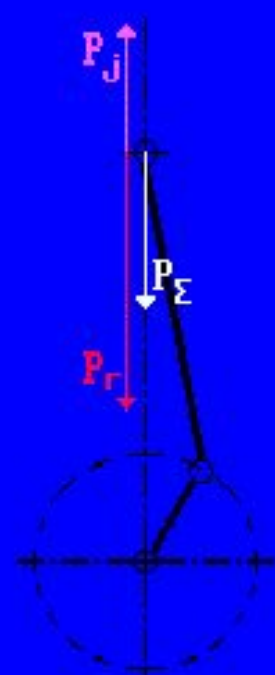
Суммарные силы и моменты, действующие в КШМ

Анализ динамики КШМ производят при совместном действии движущих газовых и инерционных сил.

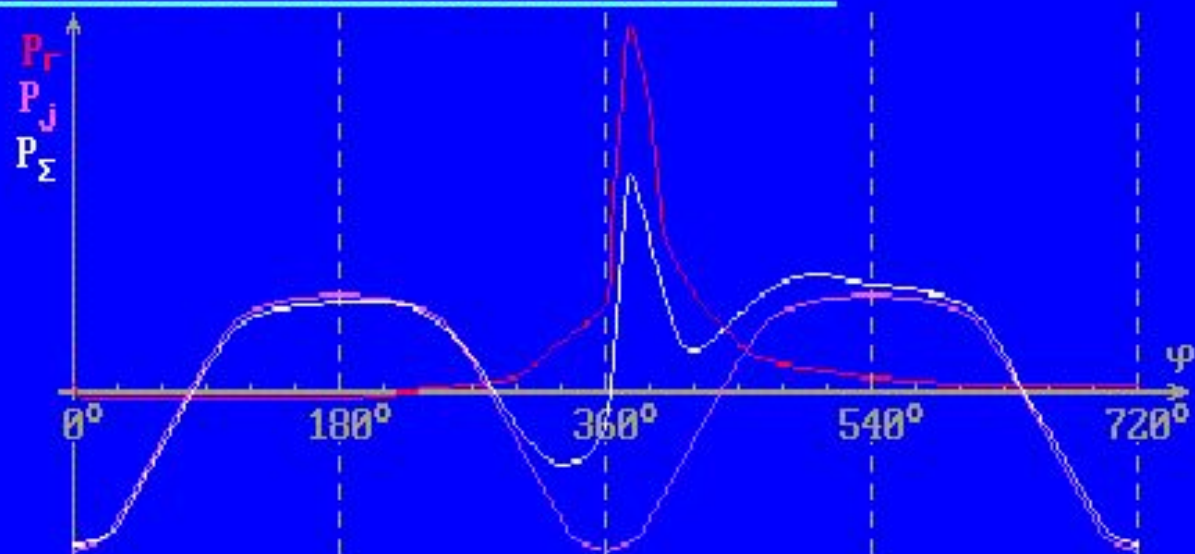
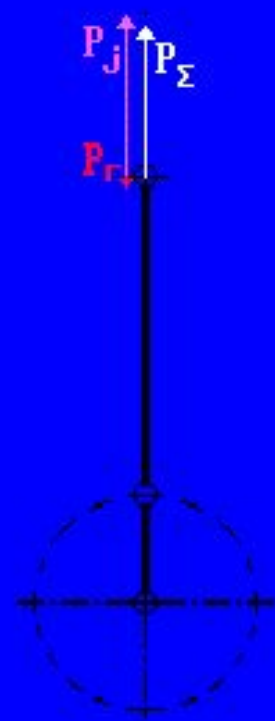
$P_{\Sigma} = P_r + P_j$ – суммарная сила. Силы P_r , P_j и P_{Σ} изменяются по углу поворота коленчатого вала и определяются режимом работы ДВС.



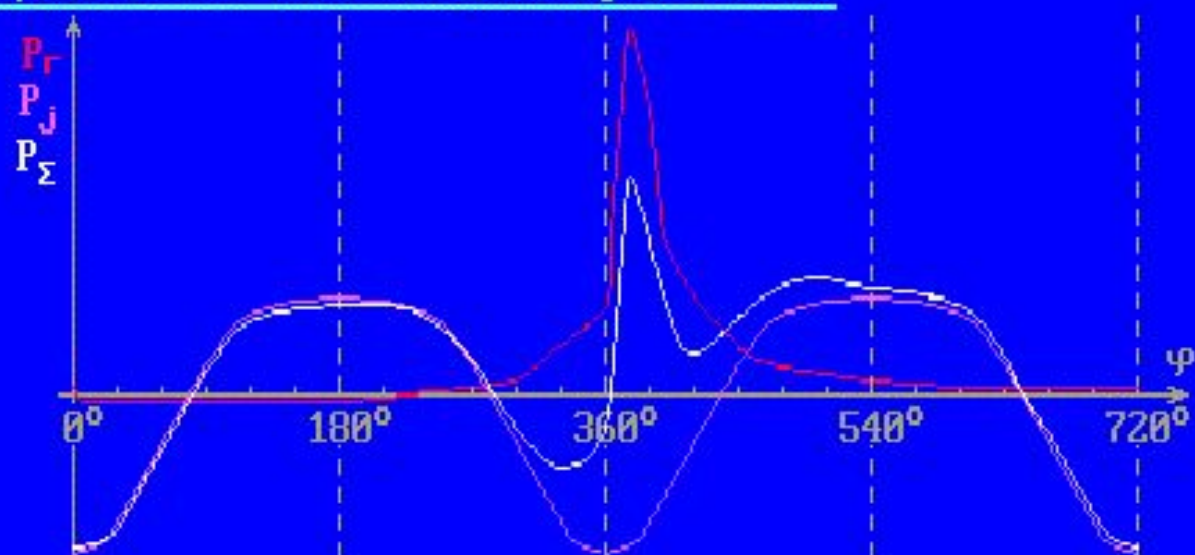
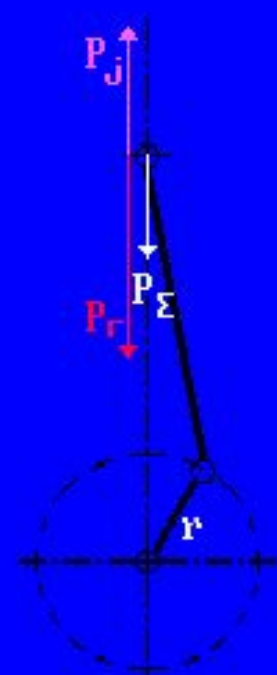
Суммарные силы и моменты, действующие в КШМ



Суммарные силы и моменты, действующие в КШМ

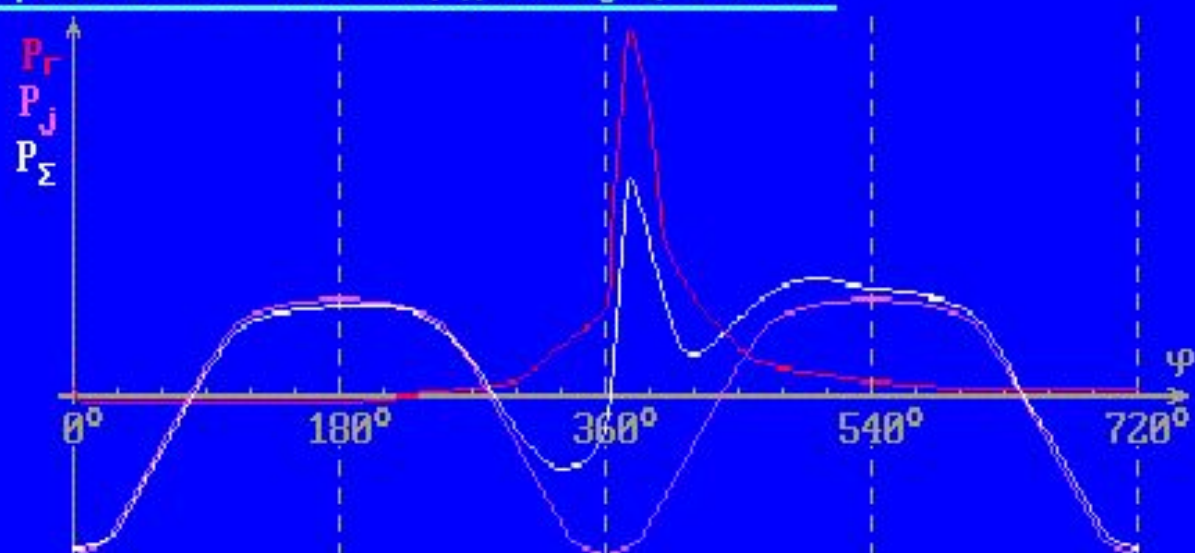
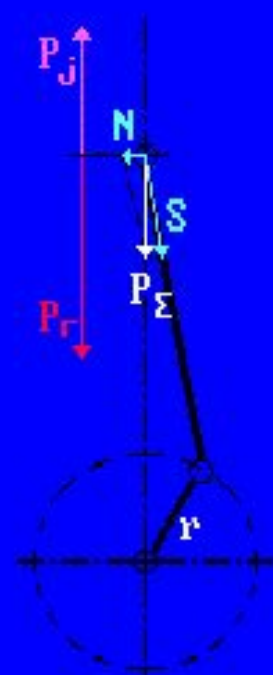


Суммарные силы и моменты, действующие в КШМ



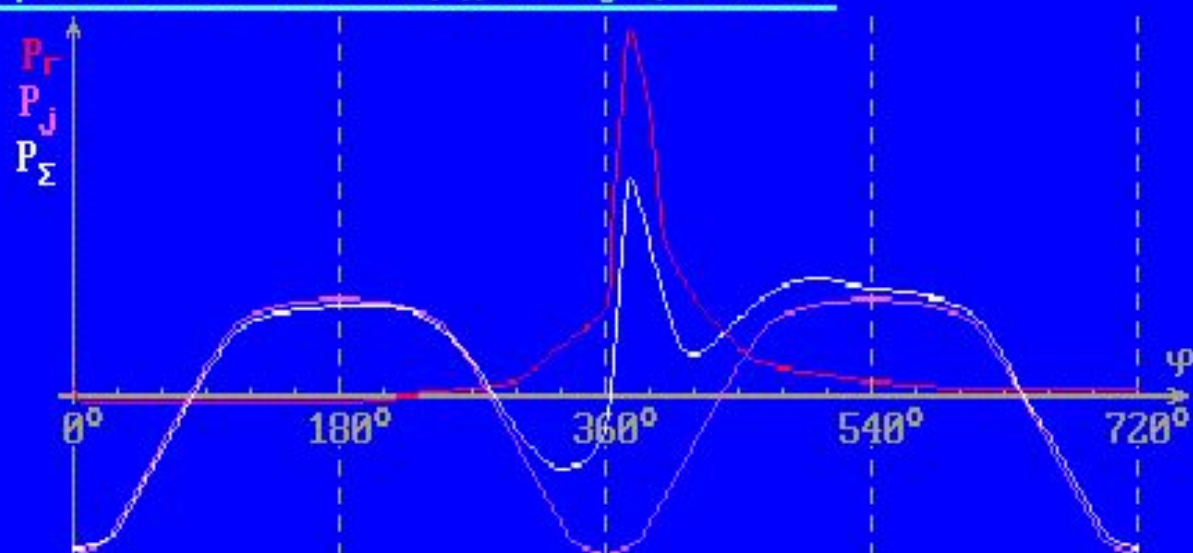
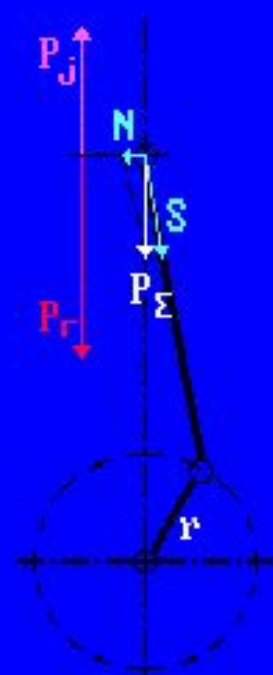
Воздействие силы P_Σ на элементы КШМ можно рассмотреть, разложив ее на две составляющие:

Суммарные силы и моменты, действующие в КШМ



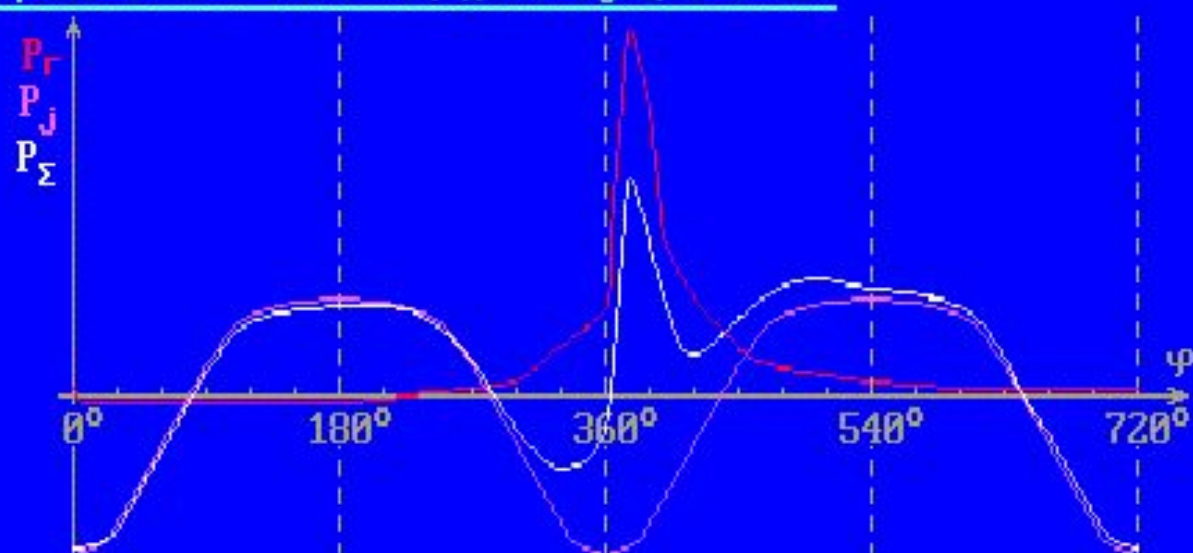
Воздействие силы P_Σ на элементы КШМ можно рассмотреть, разложив ее на две составляющие: сила S действует вдоль шатуна и сжимает-растягивает его, а сила N перпендикулярна к оси цилиндра и прижимает поршень к зеркалу цилиндра.

Суммарные силы и моменты, действующие в КШМ



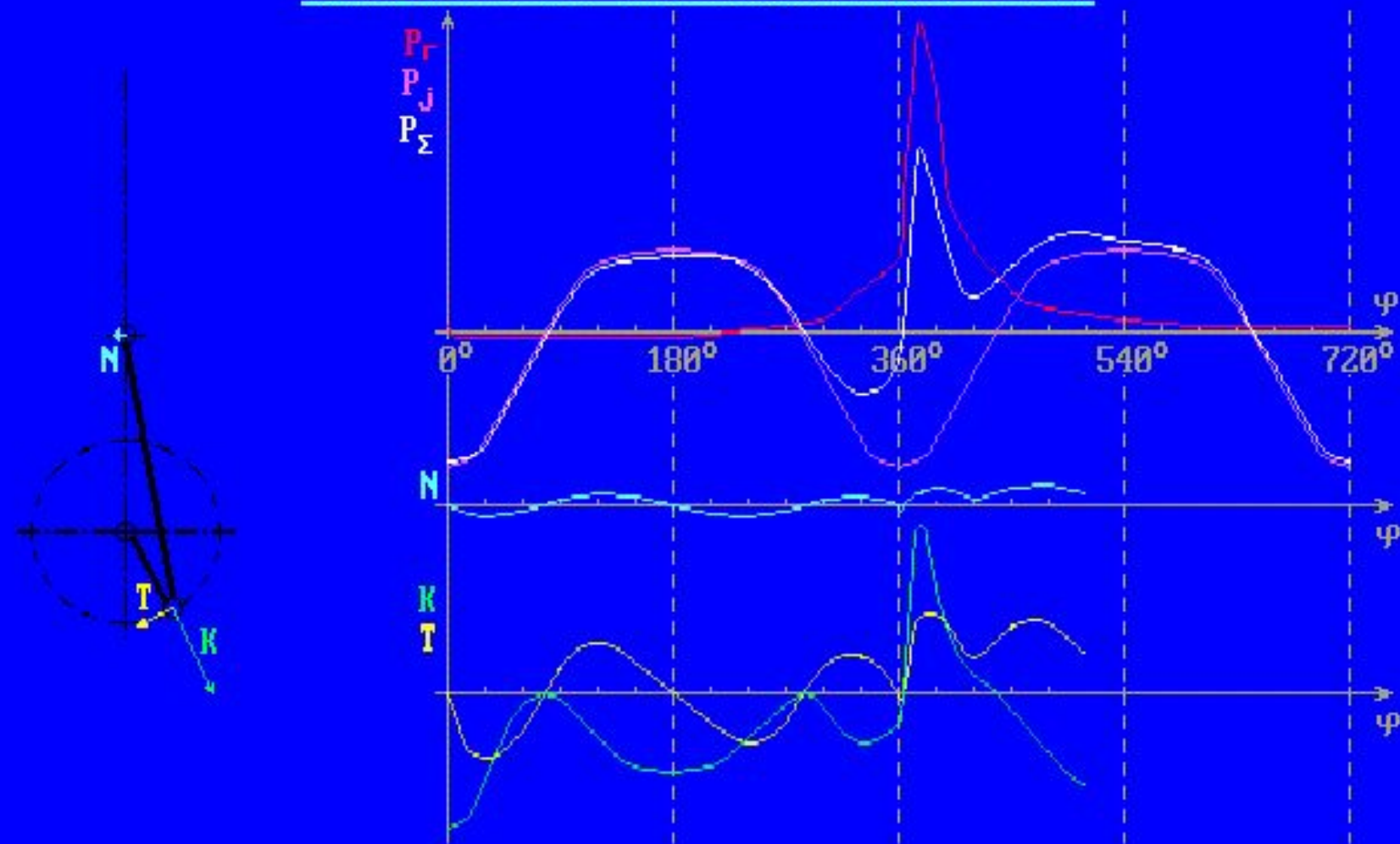
Действие силы S на кривошип можно представить, перенеся ее вдоль оси шатуна к оси шатунной шейки и разложив на две составляющие. Нормальная сила N направлена по оси кривошипа и сжимает-растягивает его, а тангенциальная сила T на плече r воздействует на кривошип и создает крутящий момент $M_{кр} = T \cdot r$, который воспринимается потребителем.

Суммарные силы и моменты, действующие в КШМ

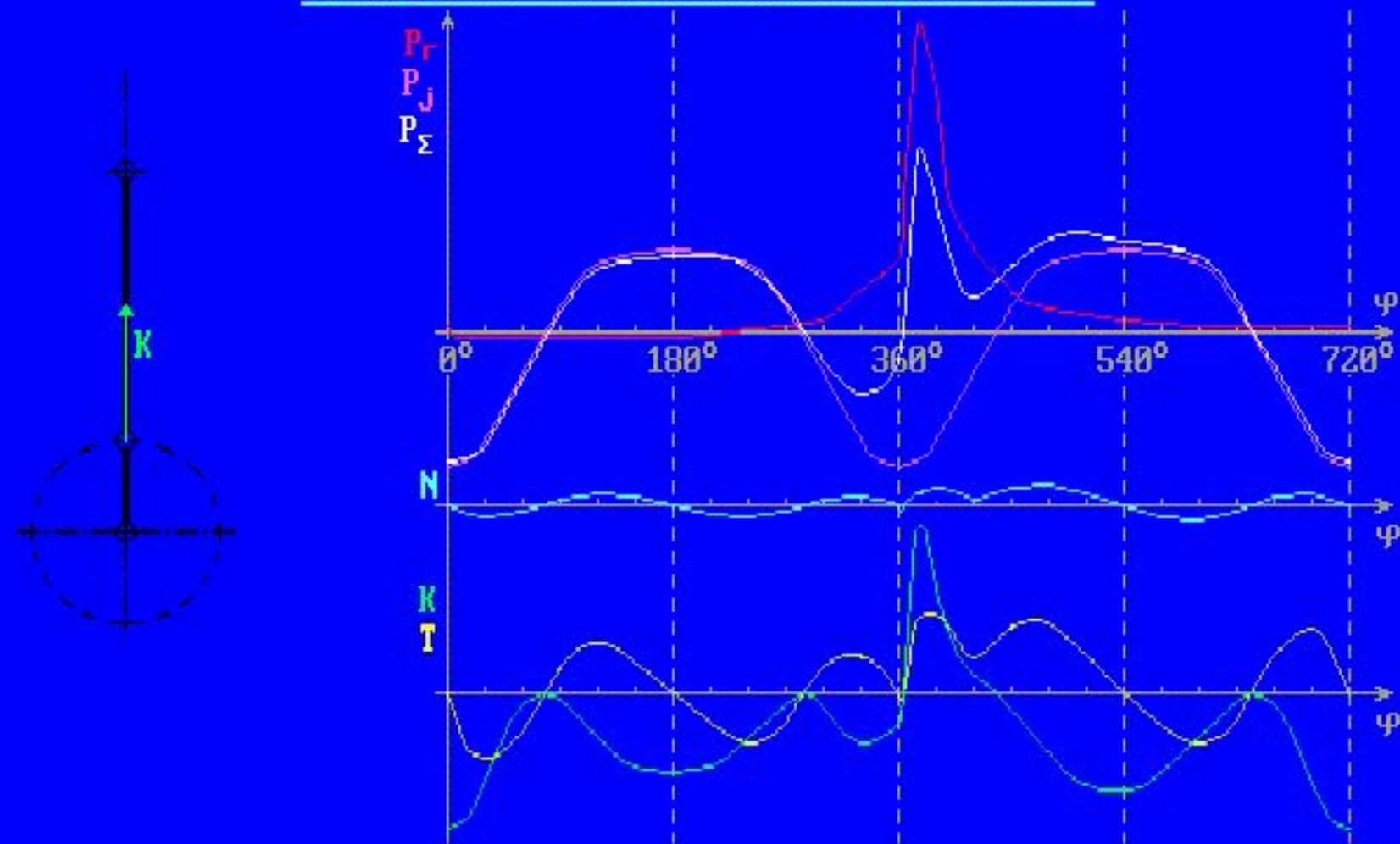


Действие силы S на кривошип можно представить, перенеся ее вдоль оси шатуна к оси шатунной шейки и разложив на две составляющие. Нормальная сила K направлена по оси кривошипа и сжимает-растягивает его, а тангенциальная сила T на плече r воздействует на кривошип и создает крутящий момент $M_{кр} = T \cdot r$, который воспринимается потребителем.

Суммарные силы и моменты, действующие в КШМ



Суммарные силы и моменты, действующие в КШМ



Суммарные силы и моменты, действующие в КШМ



Силы K и T передаются на коренные опоры КШМ. При перенесении их в центр коренной опоры в соответствии с правилами теоретической механики получим силы K' , T' и T'' , а также M_{KP} , образованный парой сил T и T' .

Суммарные силы и моменты, действующие в КШМ



Силы K и T передаются на коренные опоры КШМ. При перенесении их в центр коренной опоры в соответствии с правилами теоретической механики получим силы K' , T' и T'' , а также $M_{кр}$, образованный парой сил T и T' .

Результирующую S'' можно разложить на две составляющие N' и P'_{Σ} .

Суммарные силы и моменты, действующие в КШМ

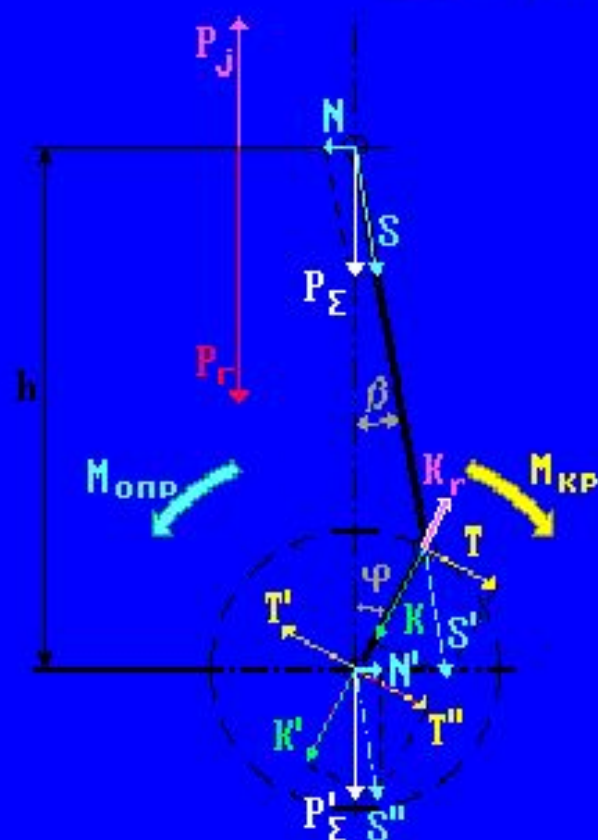


Силы K и T передаются на коренные опоры КШМ. При перенесении их в центр коренной опоры в соответствии с правилами теоретической механики получим силы K', T' и T'' , а также $M_{КР}$, образованный парой сил T и T' .

Результирующую S'' можно разложить на две составляющие N' и P'_Σ .

$$N = -N' ; P_\Sigma = P'_\Sigma .$$

Суммарные силы и моменты, действующие в КШМ



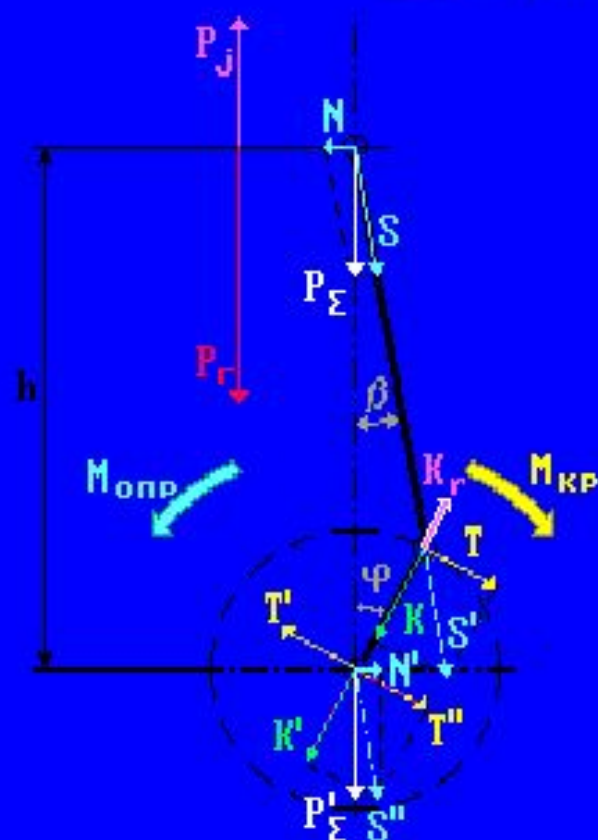
Силы K и T передаются на коренные опоры КШМ. При перенесении их в центр коренной опоры в соответствии с правилами теоретической механики получим силы K' , T' и T'' , а также $M_{кр}$, образованный парой сил T и T' .

Результирующую S'' можно разложить на две составляющие N' и P'_{Σ} .

$$N = -N' ; P_{\Sigma} = P'_{\Sigma} .$$

Силы N и N' на плече h создаст опрокидывающий момент $M_{опр} = N \cdot h$.

Суммарные силы и моменты, действующие в КШМ



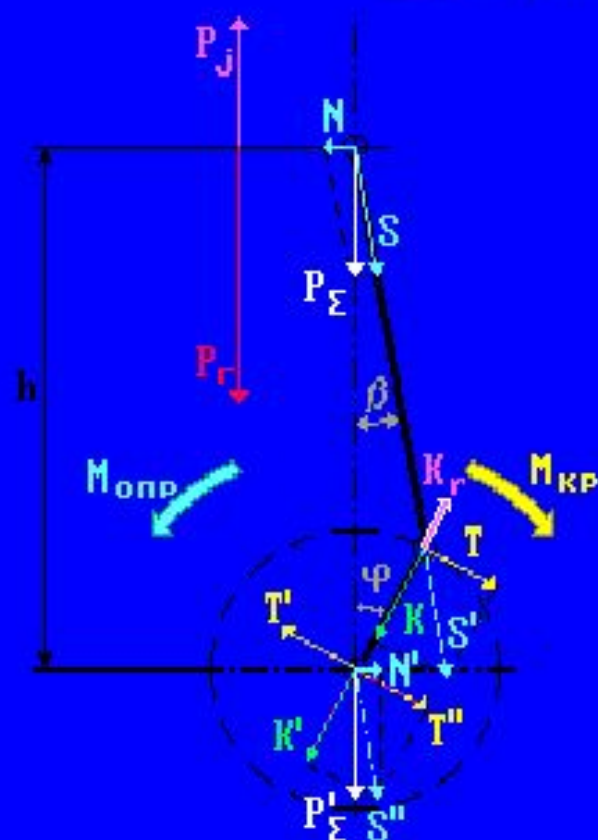
Основные соотношения для рассмотренных сил и моментов.

$$N = P_\Sigma \cdot \operatorname{tg} \beta ; \quad S = P_\Sigma \frac{1}{\cos \beta} ; \quad K = P_\Sigma \frac{\cos(\varphi + \beta)}{\cos \beta} ;$$

$$T = P_\Sigma \frac{\sin(\varphi + \beta)}{\cos \beta} ;$$

$$\begin{aligned} M_{опр} &= -N \cdot h = -P_\Sigma \cdot \operatorname{tg} \beta (l_{ш} \cos \beta + r \cos \varphi) = \\ &= -P_\Sigma \cdot r \frac{\sin(\varphi + \beta)}{\cos \beta} = -T \cdot r = -M_{кр} \end{aligned}$$

Суммарные силы и моменты, действующие в КШМ



Основные соотношения для рассмотренных сил и моментов.

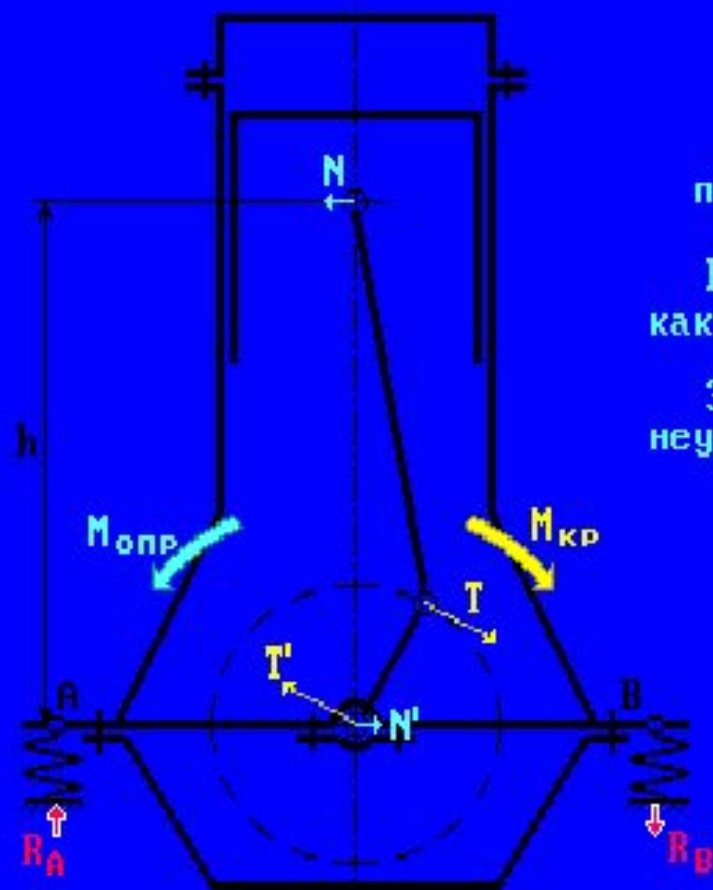
$$N = P_\Sigma \cdot \operatorname{tg} \beta ; \quad S = P_\Sigma \frac{1}{\cos \beta} ; \quad K = P_\Sigma \frac{\cos(\varphi + \beta)}{\cos \beta} ;$$

$$T = P_\Sigma \frac{\sin(\varphi + \beta)}{\cos \beta} ;$$

$$M_{опр} = -N \cdot h = -P_\Sigma \cdot \operatorname{tg} \beta (l_{ш} \cos \beta + r \cos \varphi) =$$

$$= -P_\Sigma \cdot r \frac{\sin(\varphi + \beta)}{\cos \beta} = -T \cdot r = -M_{кр}$$

Моменты $M_{кр}$ и $M_{опр}$ не уравновешивают друг друга, так как они приложены к различным элементам.



$M_{кр}$ передается потребителю.

$M_{опр}$ через картер и опоры воздействует на подвеску.

В результате появляются реакции опор, которые как и вызываемый ими момент переменны по времени.

Это обстоятельство является одной из причин неуравновешенности двигателя.