Уравновешенность и уравновешивание двигателей

$$R_A;\ R_B = f\,(P_{jI},\ P_{jII},\ K_r,\ M_{опр},\ G_{дв}).$$

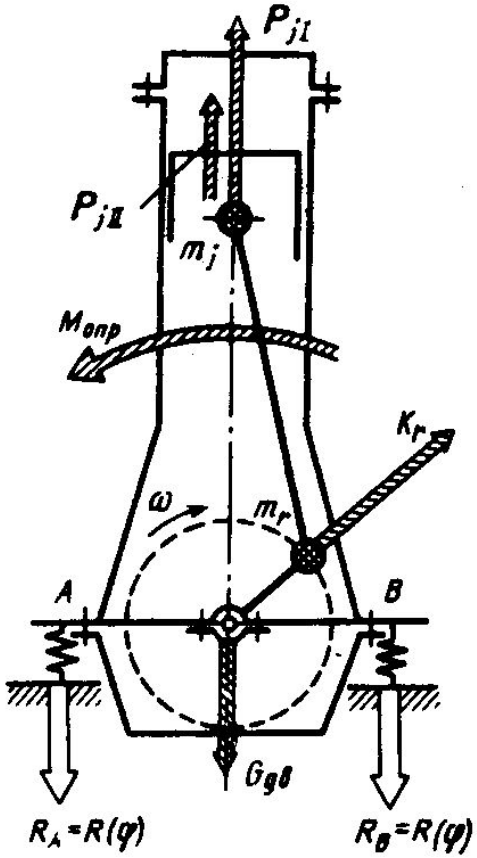


Рис. 1. Силовые факторы, вызывающие неуравновешенность одноцилиндрового двигателя

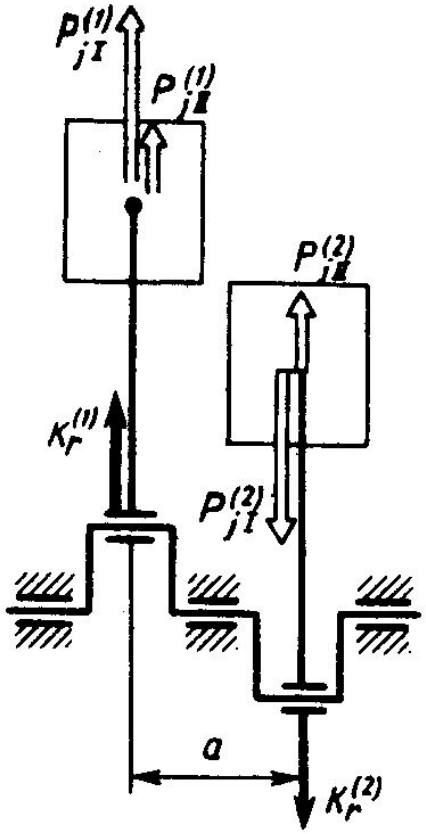


Рис. 2. К анализу силовых факторов, вызывающих неуравновешенность многоцилиндровых двигателей

Силы действующие в КШМ:

$$P_{jI}^{(1)} = C\cos\varphi;\ P_{jII}^{(1)} = C\ \lambda\cos 2\varphi;$$
$$K_r^{(1)} = m_r r\omega^2.$$

где $C = -m_j r\omega$

$$P_{jI}^{(2)} = C\cos\ (\varphi + 180°) = -C\cos\varphi;$$
$$P_{jII}^{(2)} = C\lambda\cos 2\ (\varphi + 180°) = C\lambda\cos 2\varphi;$$
$$K_r^{(2)} = m_r r\omega^2.$$

Моменты действующие в КШМ:

$$\sum_{k=1}^{2} M_r^{(k)} = K_r a,$$

$$\sum_{k=1}^{2} M_{j\mathrm{I}}^{(k)} = P_{j\mathrm{I}} a,$$

$$\sum_{k=1}^{2} M_{j\mathrm{II}}^{(k)} = 0.$$

Неуравновешенность ДВС обусловлена следующими факторами:

1) $\sum_{k=1} P_{\text{I}}^{(k)}$ — сумма сил инерции первого порядка;

2) $\sum_{k=1}^{i} P_{\text{II}}^{(k)}$ — сумма сил инерции второго порядка;

3) $\sum_{k=1}^{N} K_r^{(k)}$ — сумма центробежных сил инерции (N — количество кривошипов коленчатого вала);

4) $\sum_{k=1}^{i} M_{\text{I}}^{(k)}$ — суммарный момент сил инерции первого порядка;

5) $\sum_{k=1}^{i} M_{\text{II}}^{(k)}$ — суммарный момент сил инерции второго порядка;

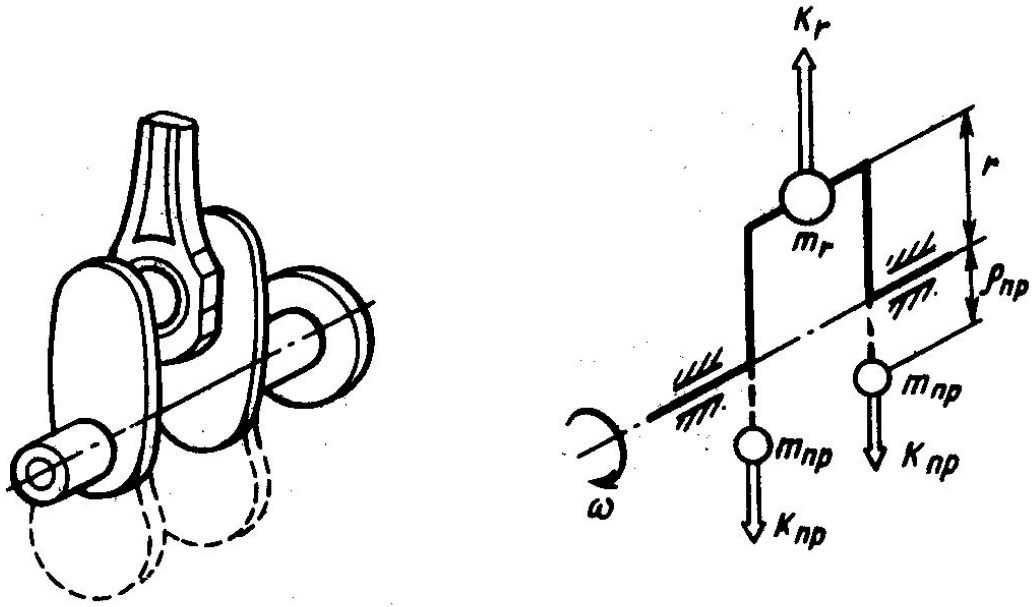
6) $\sum_{k=1}^{N} M_r^{(k)}$ — суммарный момент центробежных сил.

Таким образом, термин «полностью уравновешенный» относится к двигателю, в котором выполнены следующие условия

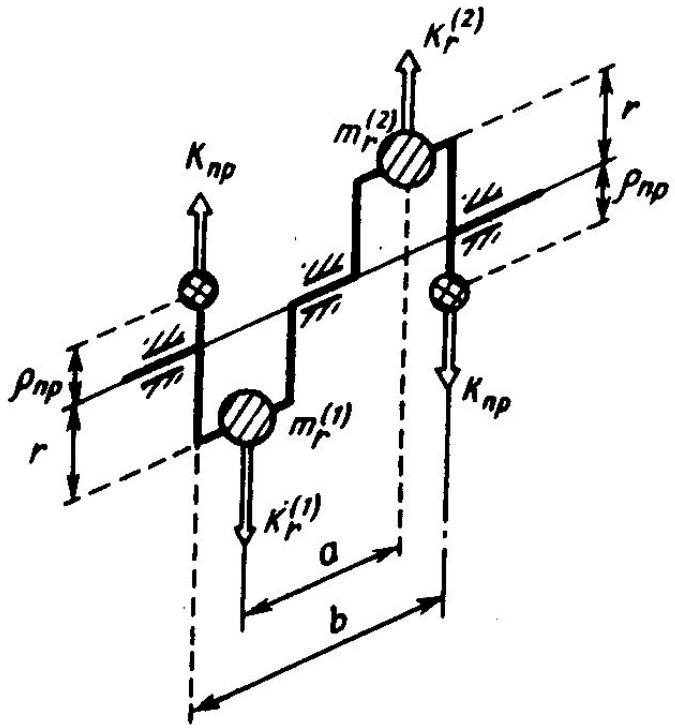
$$\sum_{k=1}^{i} P_{\text{I}}^{(k)}=0;\ \sum_{k=1}^{i} P_{\text{II}}^{(k)}=0;\ \sum_{k=1}^{N} K_r^{(k)}=0;\ \sum_{k=1}^{i} M_{\text{I}}^{(k)}=0;\ \sum_{k=1}^{i} M_{\text{II}}^{(k)}=0;\ \sum_{k=1}^{N} M_r^{(k)}=0.$$

Принципы уравновешивания центробежных сил инерции и моментов от них

Комплекс технических мероприятий, направленных на выполнение условий $\sum_{k=1}^{N} K_r^{(k)}=0$ и $\sum_{k=1}^{N} M_r^{(k)}=0$, называют уравновешиванием коленчатого вала.



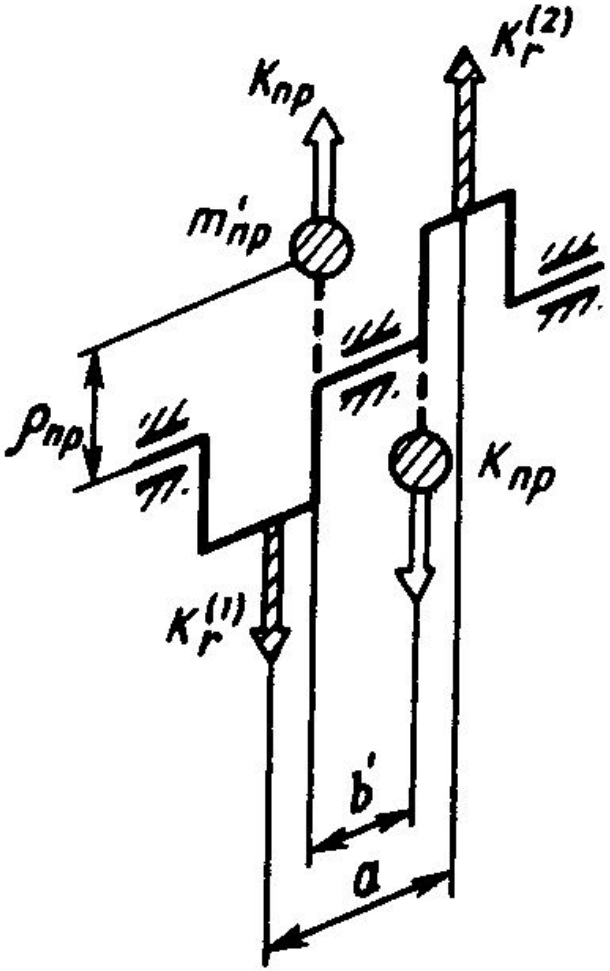
Уравновешивание вала одноцилиндрового двигателя

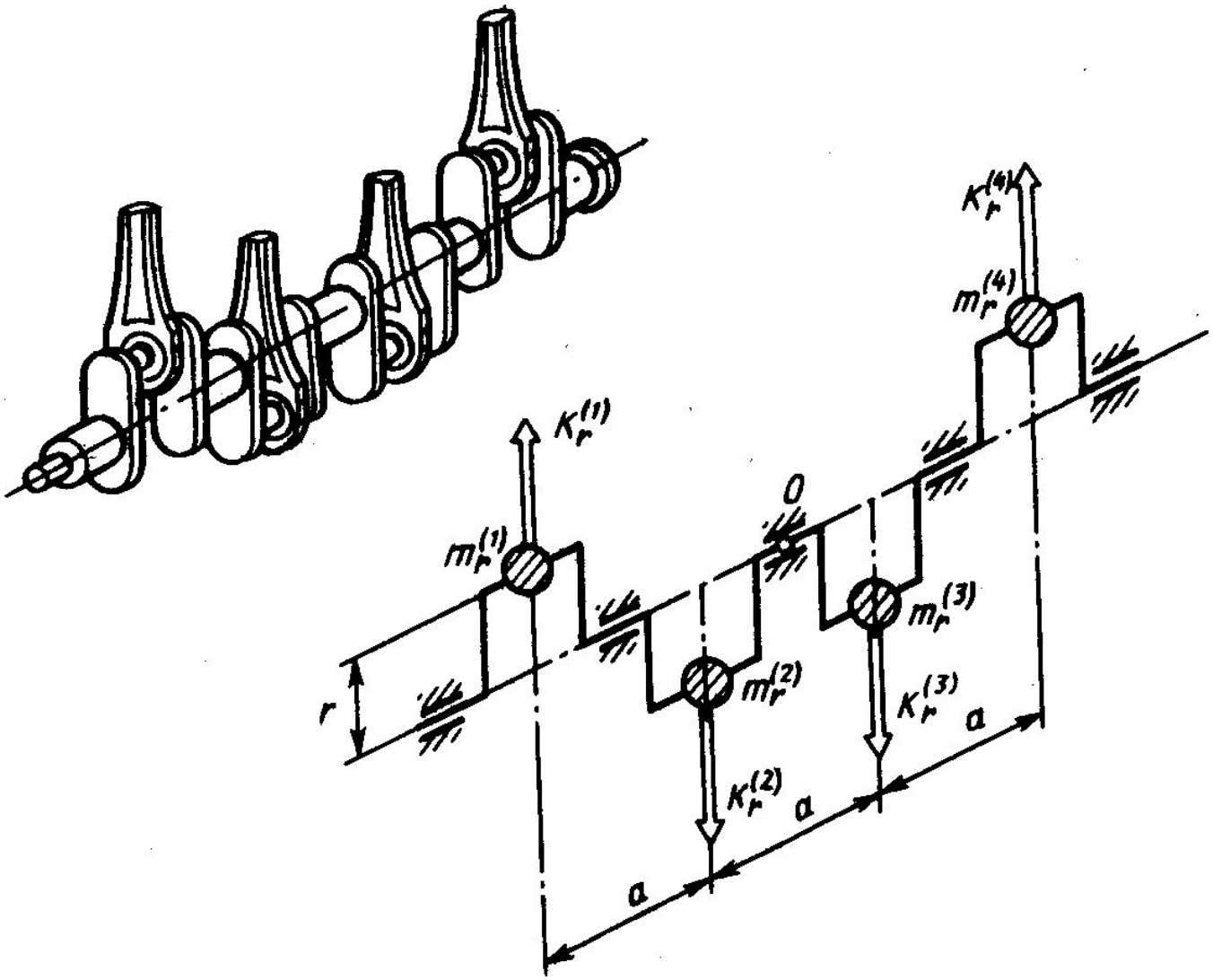


$$\sum_{k=1}^{2} K_r^{(k)} = 0 \text{ и } \sum_{k=1}^{2} M_r^{(k)} = K_r a = m_r r \omega^2 a,$$

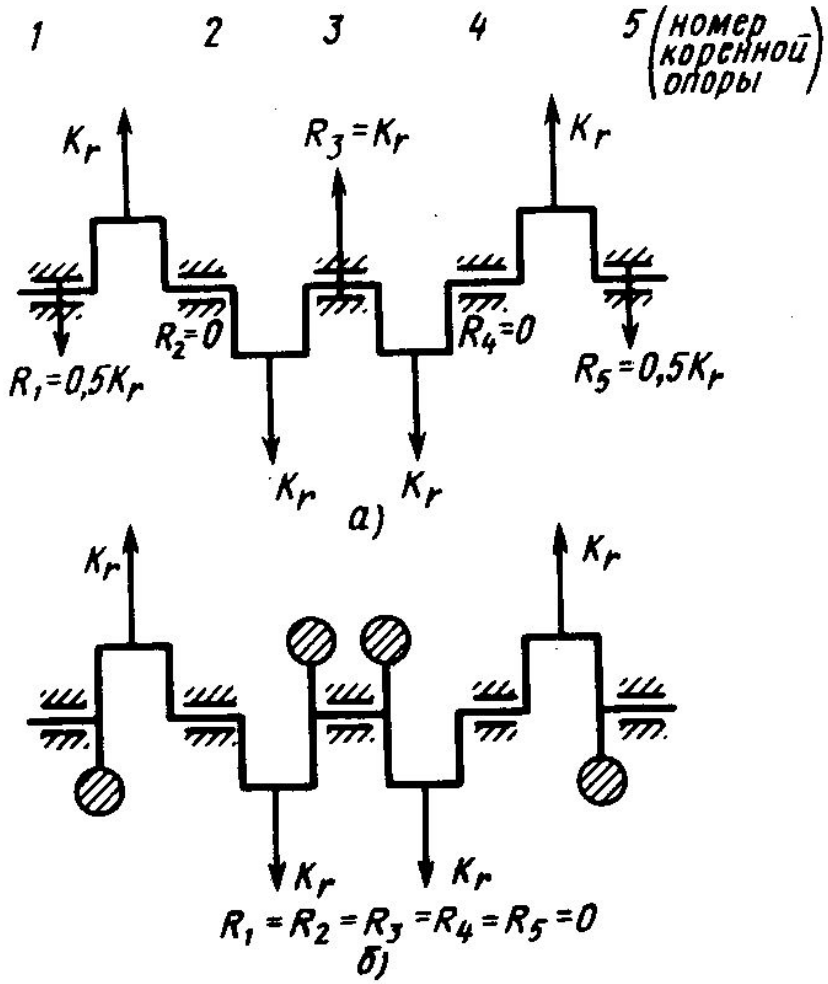
$$M_{ур} = K_{пр} b, \quad M_{ур} = \sum_{k=1}^{2} M_r^{(k)}, \; K_{пр} b = K_r a$$

$$m_{пр} = m_r \frac{r}{\rho_{пр}} \cdot \frac{a}{b}$$


$K_{пр}$
$K_r^{(2)}$
$m'_{пр}$
$\rho_{пр}$
$K_{пр}$
$K_r^{(1)}$
b'
a



Самоуравновешенный коленчатый вал четырехтактного четырехцилиндрового рядного двигателя



Нагрузка на коренные опоры четырехцилиндрового рядного двигателя:
а — **без установки противовесов,** *б* — **при установке противовесов**

Принципы уравновешивания сил инерции масс, движущихся возвратно-поступательно

Вариант первый

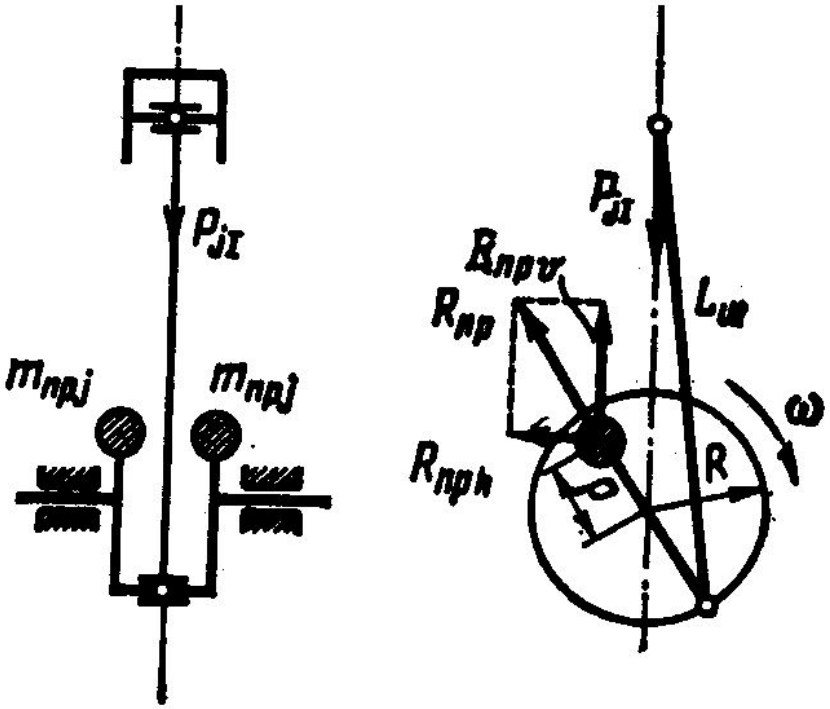
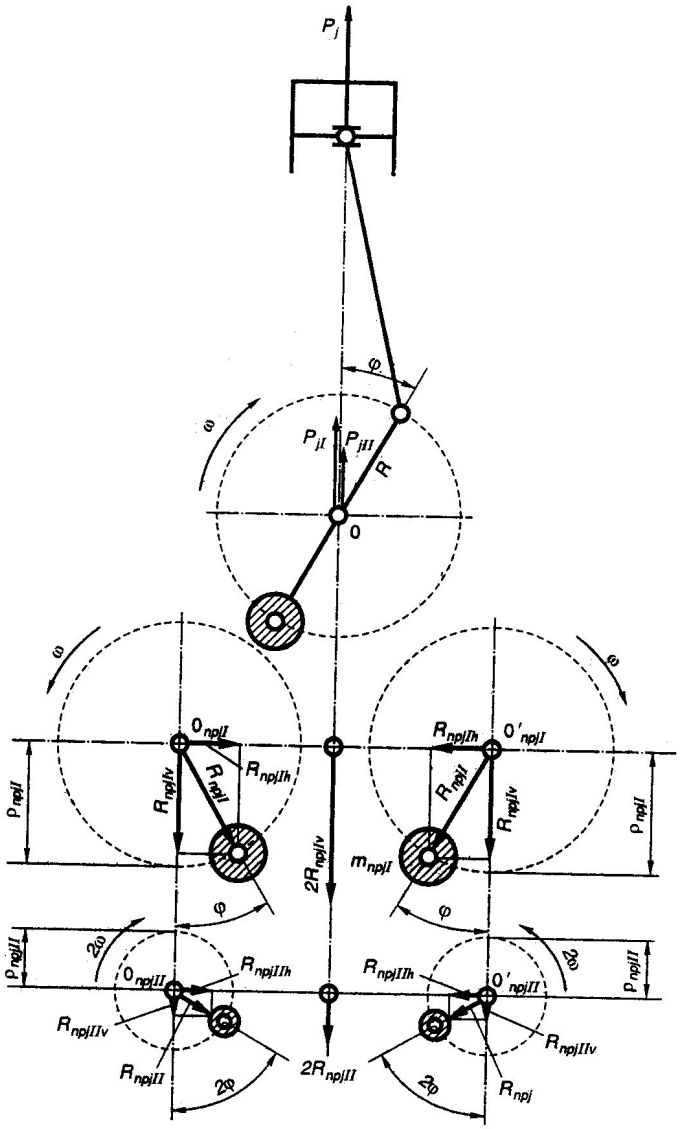


Схема переноса действия силы инерции первого порядка одноцилиндрового двигателя из вертикальной в горизонтальную плоскость

Вариант второй



Уравновешивание сил инерции в одноцилиндровом двигателе с помощью дополнительных валов с противовесами

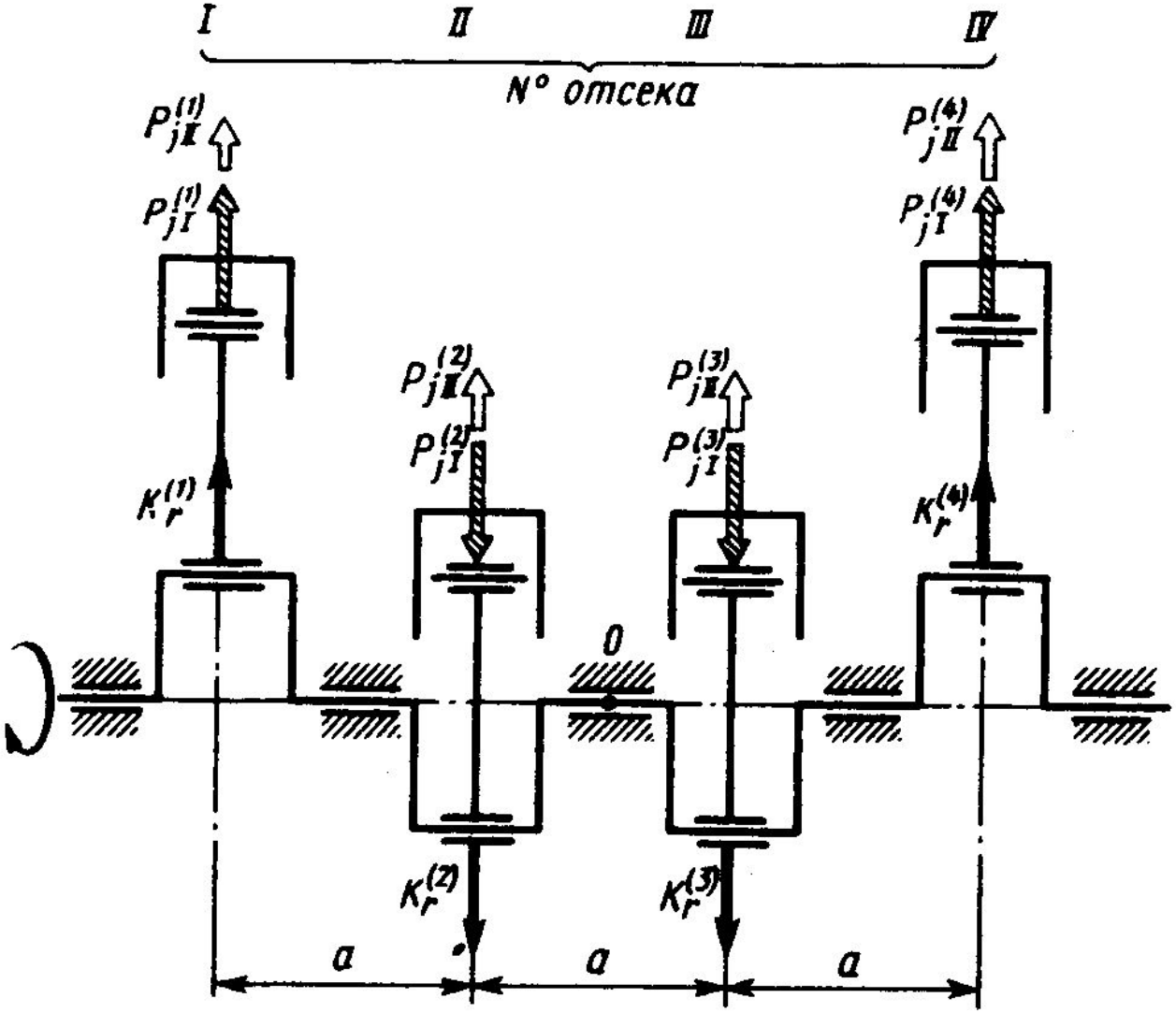


Схема коленчатого вала и сил инерции, действующих в четырехцилиндровом двигателе

Силы действующие в КШМ

1-й отсек

$$P_{j\mathrm{I}}^{(1)} = C\cos\varphi$$
$$P_{j\mathrm{II}}^{(1)} = \lambda C\cos 2\varphi$$
$$K_r^{(1)} = m_r r\omega^2$$

2-й отсек

$$P_{j\mathrm{I}}^{(2)} = C\cos\,(\varphi + 180^\circ) = -C\cos\varphi$$
$$P_{j\mathrm{II}}^{(2)} = \lambda C\cos 2\,(\varphi + 180^\circ) = \lambda C\cos 2\varphi$$
$$K_r^{(2)} = -m_r r\omega^2$$

3-й отсек

$$P_{j\mathrm{I}}^{(3)} = C\cos\,(\varphi + 180^\circ) = -C\cos\varphi$$
$$P_{j\mathrm{II}}^{(3)} = \lambda C\cos 2\,(\varphi + 180^\circ) = \lambda C\cos 2\varphi$$
$$K_r^{(3)} = -m_r r\omega^2$$

4-й отсек

$$P_{j\mathrm{I}}^{(4)} = C\cos\varphi$$
$$P_{j\mathrm{II}}^{(4)} = \lambda C\cos 2\varphi$$
$$K_r^{(4)} = m_r r\omega^2$$

1) $\sum\limits_{k=1}^{4} P_{j\mathrm{I}}^{(k)} = 0$; 2) $\sum\limits_{k=1}^{4} P_{j\mathrm{II}}^{(k)} = 4\lambda C\cos 2\varphi$; 3) $\sum\limits_{k=1}^{4} K_r^{(k)} = 0$.

Моменты действующие в КШМ

1-й отсек

$$M_{jI}^{(1)} = P_{jI}^{(1)}\, 1{,}5a$$
$$M_{jII}^{(1)} = P_{jII}^{(1)}\, 1{,}5a$$
$$M_{r}^{(1)} = K_{r}^{(1)}\, 1{,}5a$$

2-й отсек

$$M_{jI}^{(2)} = P_{jI}^{(2)}\, 0{,}5a$$
$$M_{jII}^{(2)} = P_{jII}^{(2)}\, 0{,}5a$$
$$M_{r}^{(2)} = K_{r}^{(2)}\, 0{,}5a$$

3-й отсек

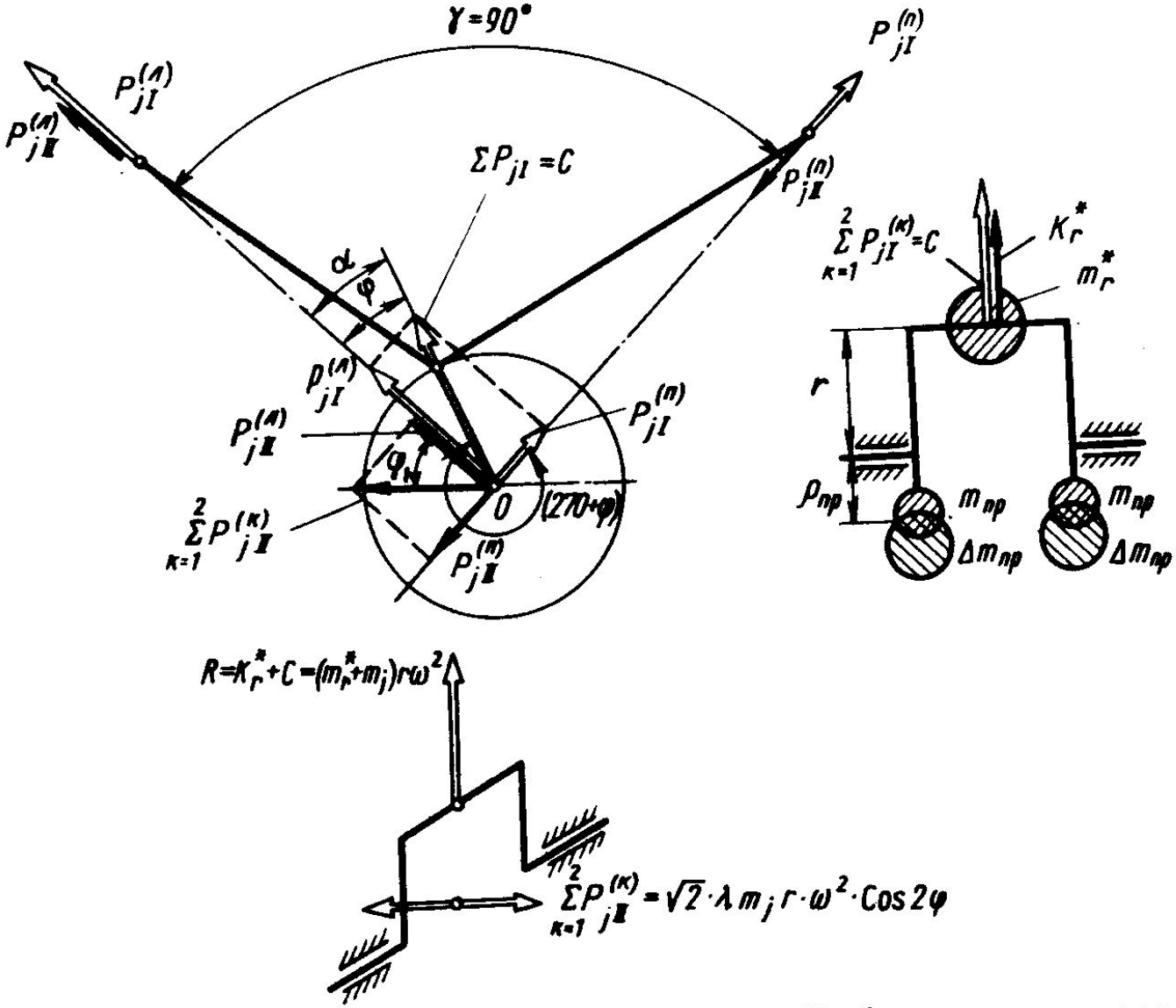
$$M_{jI}^{(3)} = -P_{jI}^{(3)}\, 0{,}5a$$
$$M_{jII}^{(3)} = -P_{jII}^{(3)}\, 0{,}5a$$
$$M_{r}^{(3)} = -K_{r}^{(3)}\, 0{,}5a$$

4-й отсек

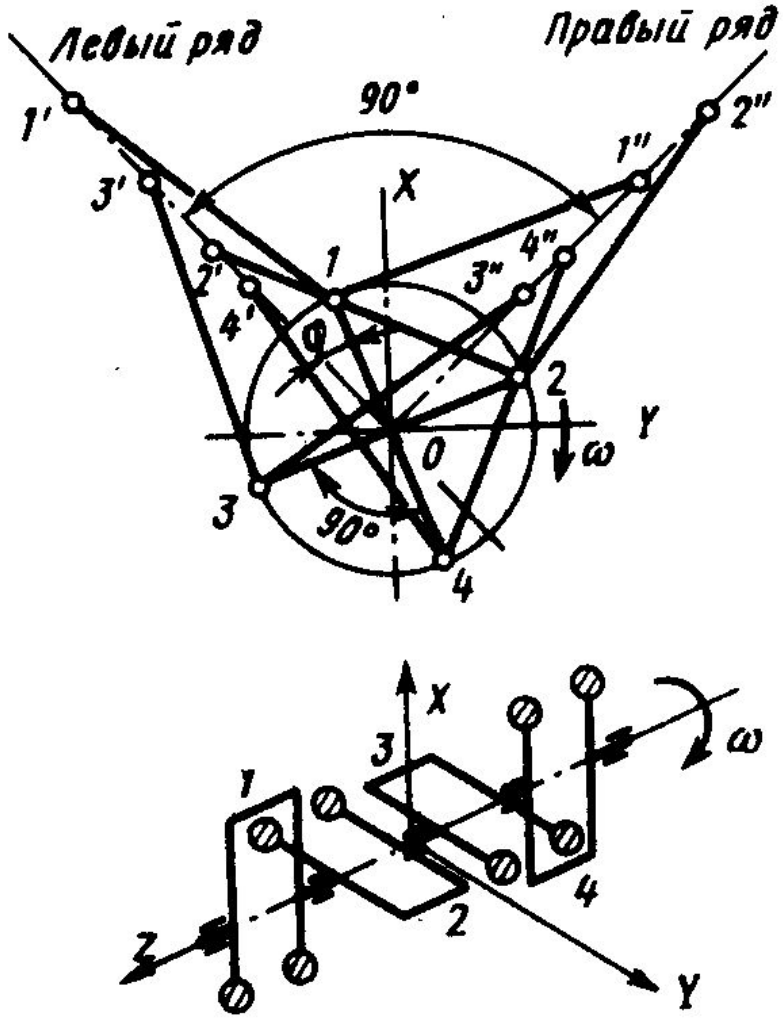
$$M_{jI}^{(4)} = -P_{jI}^{(4)}\, 1{,}5a$$
$$M_{jII}^{(4)} = -P_{jII}^{(4)}\, 1{,}5a$$
$$M_{r}^{(4)} = -K_{r}^{(4)}\, 1{,}5a$$

Отсюда

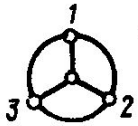
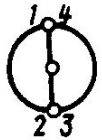
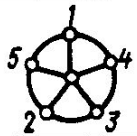
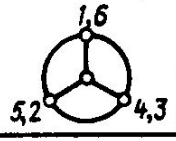
4) $\sum_{k=1}^{4} M_{jI}^{(k)} = 0$; 5) $\sum_{k=1}^{4} M_{jII}^{(k)} = 0$; 6) $\sum_{k=1}^{4} M_{r}^{(k)} = 0$

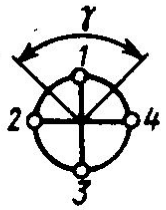
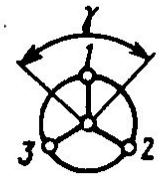
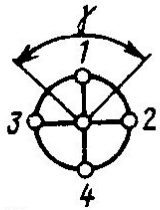
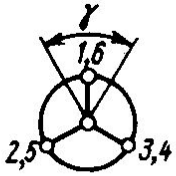


Уравновешивание двухцилиндрового V-образного двигателя с γ=90°



К анализу уравновешенности восьмицилиндрового V-образного двигателя с $\gamma = 90°$

Количество цилиндров	Схема расположения кривошипов	Углы между кривошипами / рядами	Угол между вспышками, град	Порядок работы цилиндров	Максимальные значения неуравновешенных факторов					
					ΣK_r	ΣP_{jI}	ΣP_{jII}	ΣM_r	ΣM_{jI}	ΣM_{jII}
Линейные четырехтактные двигатели										
2		360° / —	360	1-2	$2K_r$	$2C$	$2\lambda C$	0	0	0
2		180° / —	180 540	1-2	0	0	$2\lambda C$	$K_r a$	Ca	0
3		120° / —	240	1-2-3	0	0	0	$\sqrt{3}K_r a$	$\sqrt{3}Ca$	$\sqrt{3}\lambda Ca$
4		180° / —	180	1-3-4-2 1-2-4-3	0	0	$4\lambda C$	0	0	0
5		72° / —	144	1-2-4-5-3	0	0	0	$0{,}449 \times K_r a$	$0{,}449 \times Ca$	$4{,}98C\lambda a$
6		120° /	120	1-5-3-6-2-4 1-2-4-6-5-3	0	0	0	0	0	0

Количество цилиндров	Схема расположения кривошипов	Углы между кривошипами / рядами	Угол между вспышками, град	Порядок работы цилиндров	Максимальные значения неуравновешенных факторов					
					ΣK_r	ΣP_{jI}	ΣP_{jII}	ΣM_r	ΣM_{jI}	ΣM_{jII}
V-образные четырехтактные двигатели										
4		270° / 90°	180	1л-2л-2п-1п	0	0	$2\sqrt{2}\lambda C$	$2\sqrt{2}\times K_r a$	$2\sqrt{2}Ca$	0
6		120° / 90°	90...150	1л-1п-2л-2п-3л-3п	0	0	0	$\sqrt{3}K_r a$	$\sqrt{3}Ca$	$2{,}449Ca\lambda$
		120° / 120°	120	1л-1п-2л-2п-3л-3п	0	0	0	$\sqrt{3}K_r a$	$2{,}6Ca$	$2{,}6\lambda Ca$
8		90° / 90°	90	1л-3л-3п-2л-2п-1п-4л-4п	0	0	0	$\sqrt{10}\times K_r a$	$\sqrt{10}Ca$	0
12		120° / 60°	60	1л-6п-5л-2п-3л-4п-6л-1п-2л-5п-3л-4п	0	0	0	0	0	0