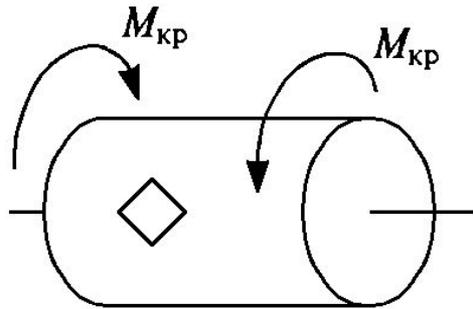


Часть 3

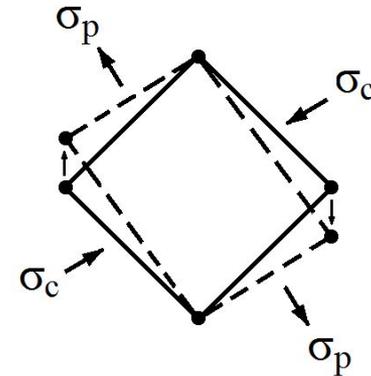
Датчики

Датчики крутящего момента

Первый способ определения крутящего момента — измерение напряжений на поверхности вала



Приложение к валу крутящего момента



Нормальные напряжения

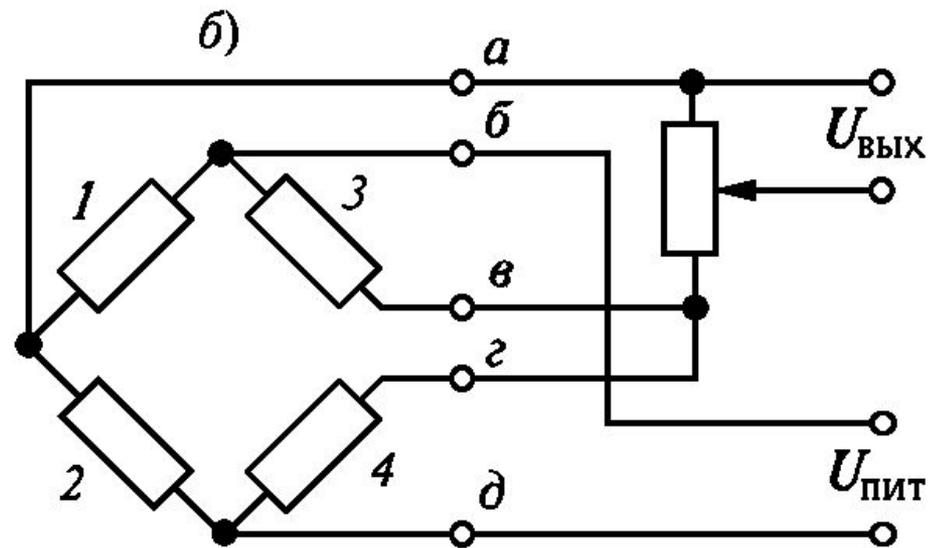
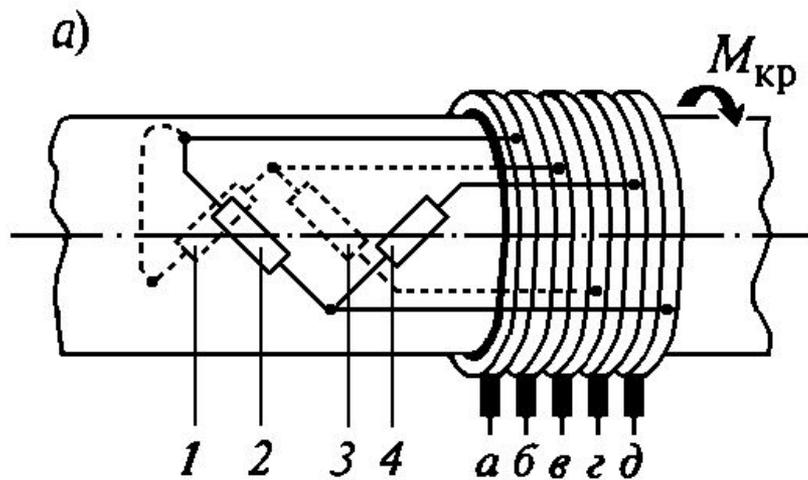
Для сплошного вала

$$\sigma_n = \frac{16M_{кр}}{\pi d^3}$$

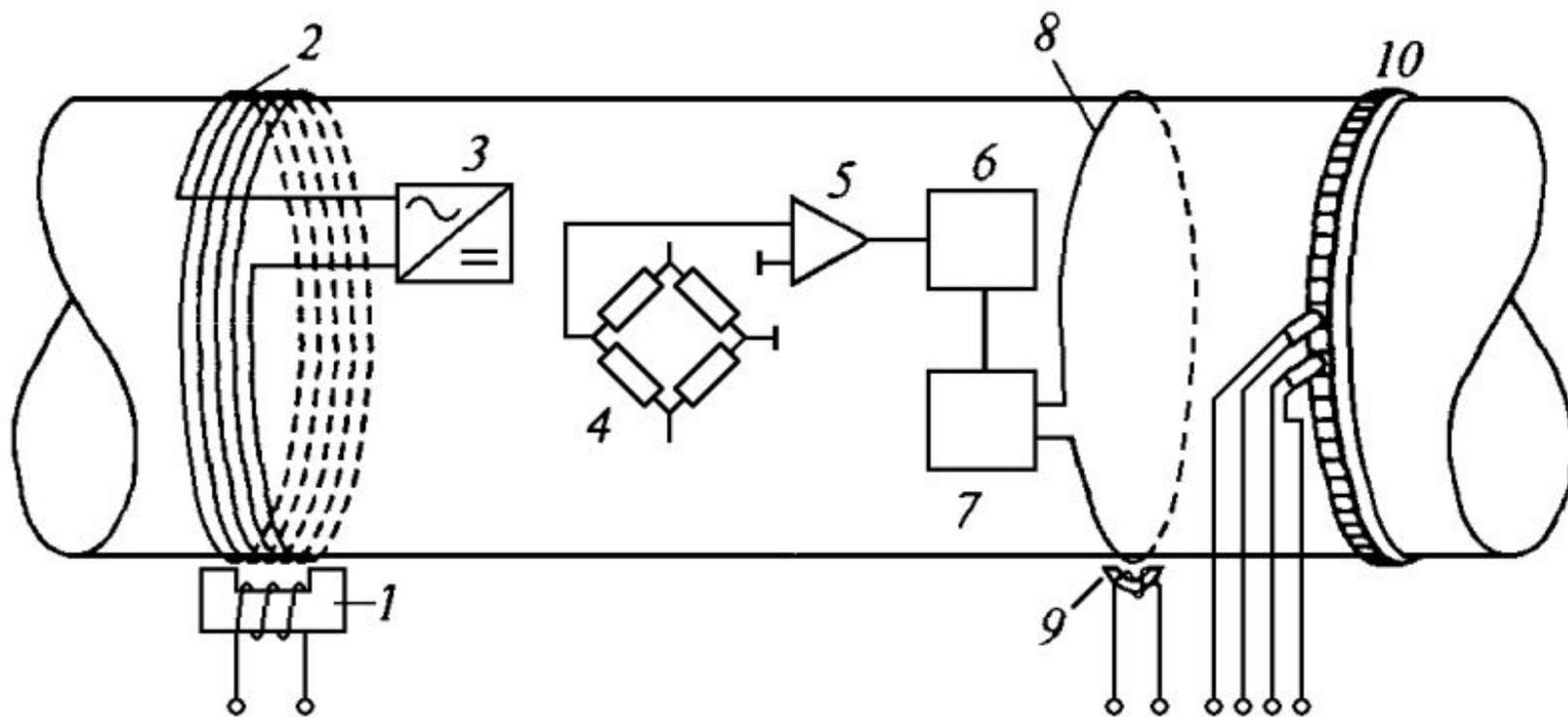
Для полого вала

$$\sigma_n = \frac{16M_{кр}}{\pi d^3 \left(1 - \frac{d_0^4}{d^4}\right)}$$

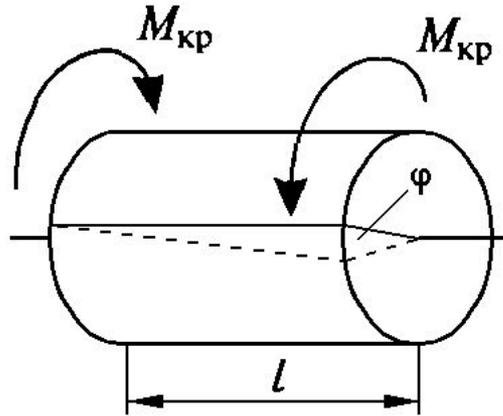
Тензорезисторный датчик крутящего момента



Телеметрический тензорезисторный датчик



Второй способ. Измерение угла закручивания



Для сплошного вала

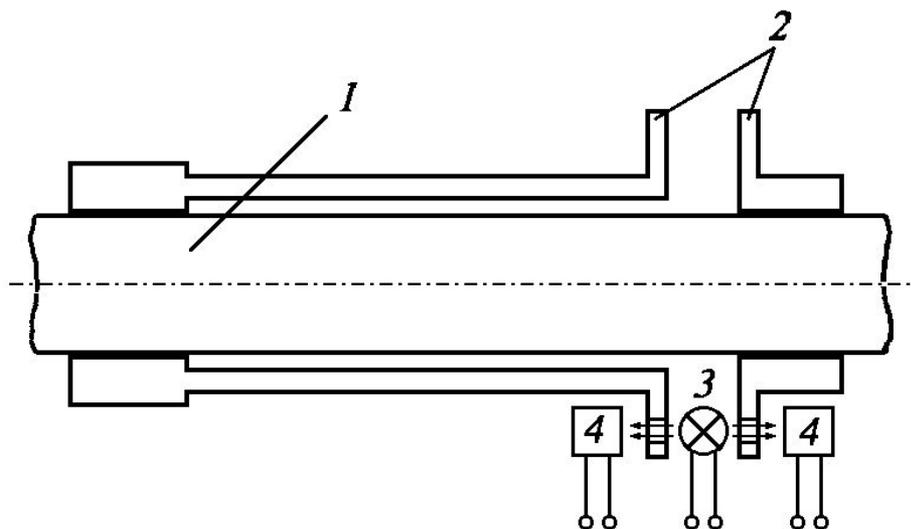
$$\varphi = \frac{32 l M_{кр}}{\pi d^4 G},$$

где G – модуль сдвига

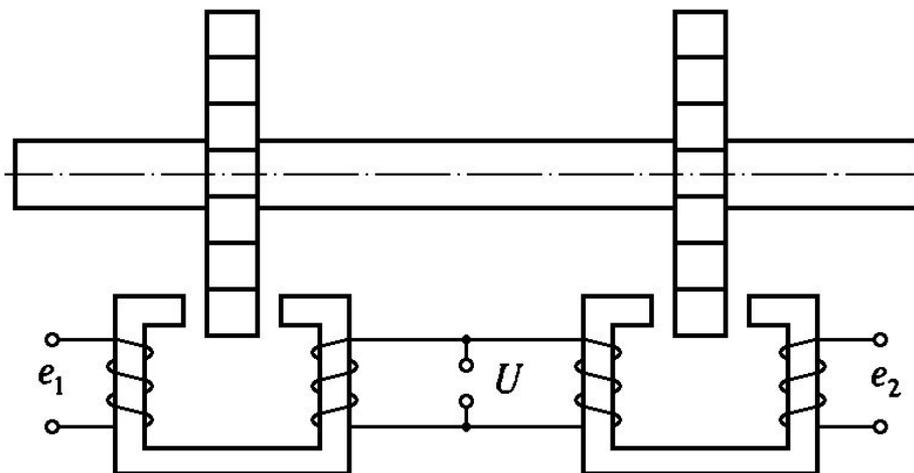
Для полого вала

$$\varphi = \frac{32 l M_{кр}}{\pi (d^4 - d_0^4) G}$$

Фотоэлектрический датчик крутящего момента

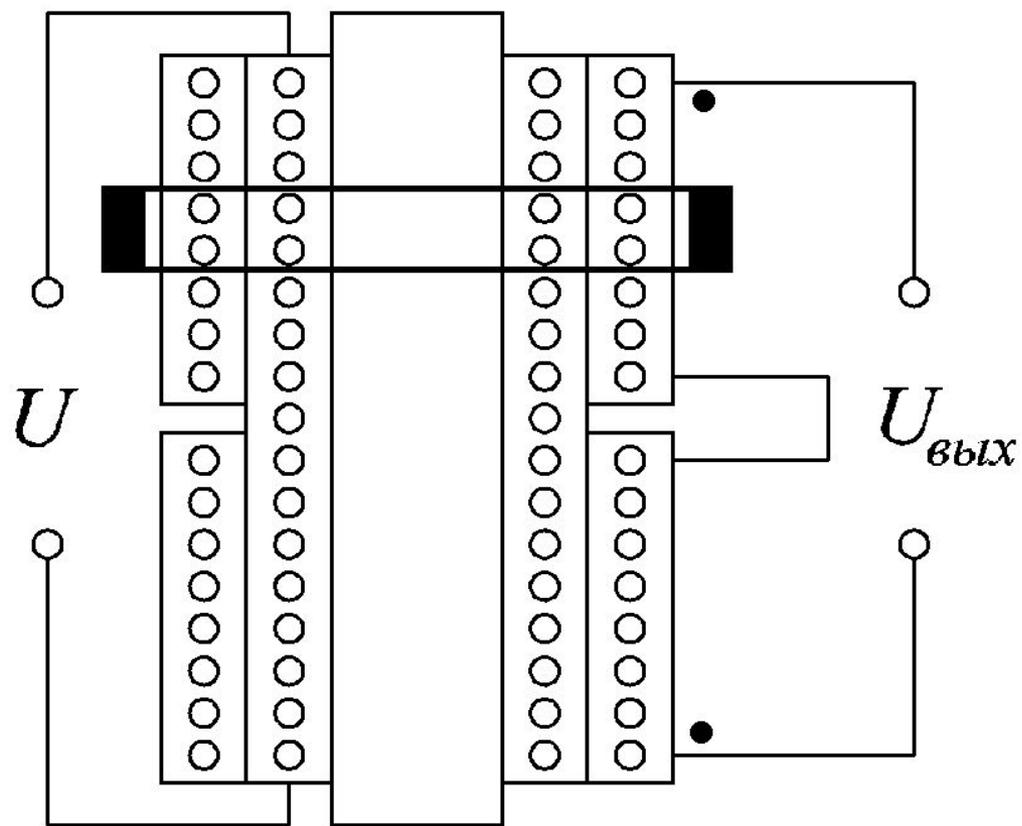


Индукционный датчик крутящего момента

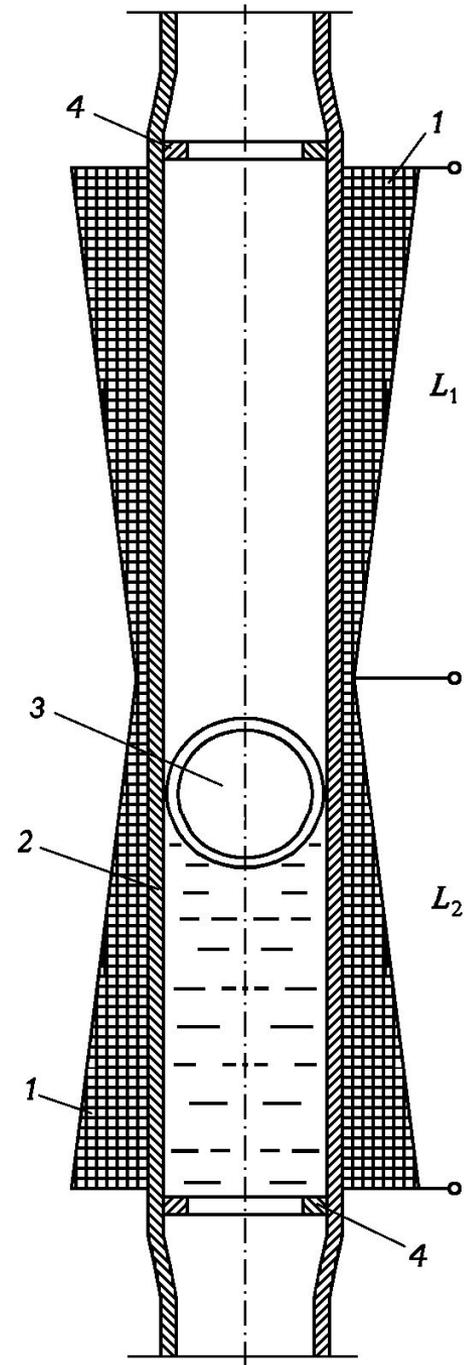


Датчики уровня

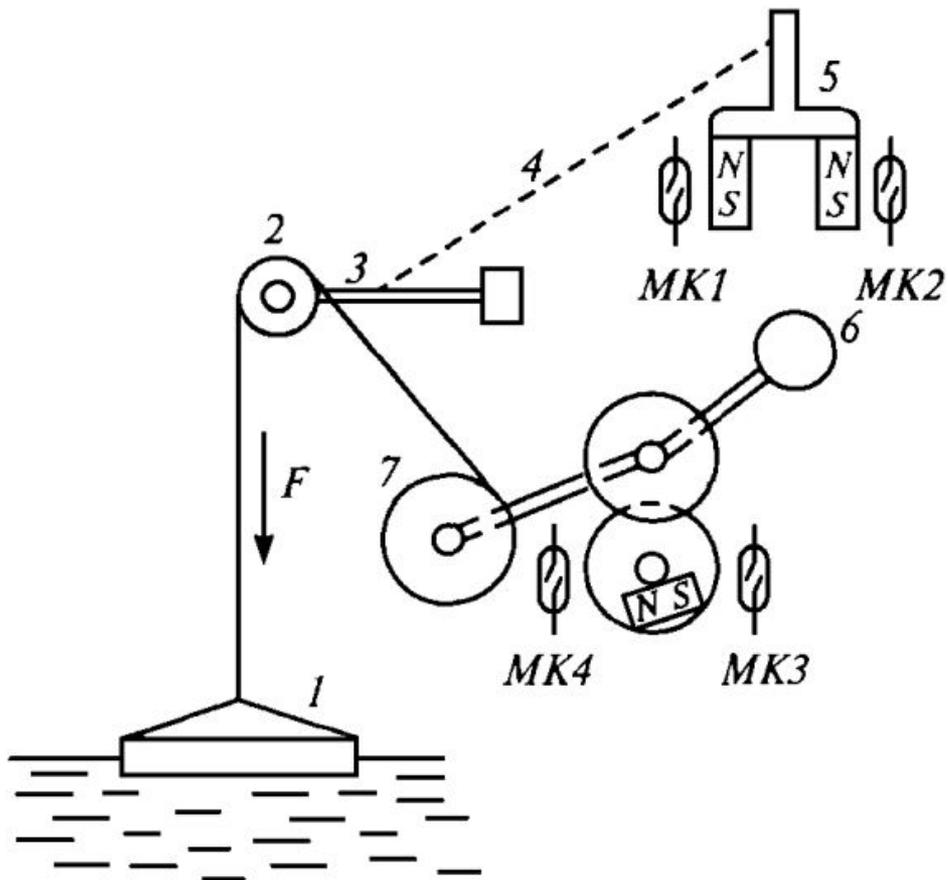
Дифференциально-трансформаторный
поплавокый датчик уровня



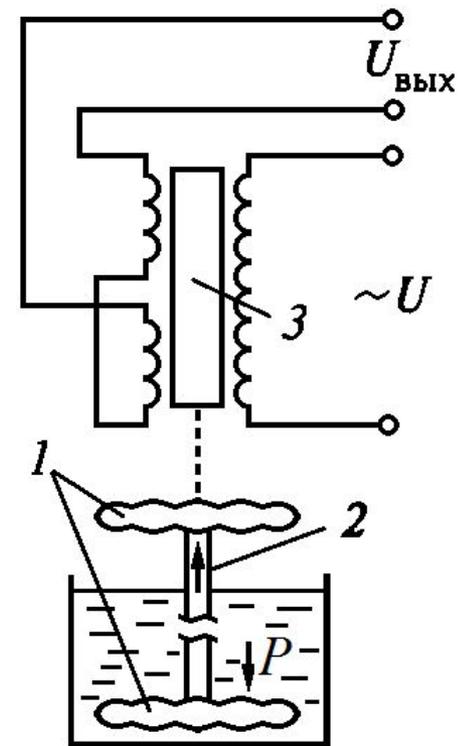
Индуктивный поплавковый датчик уровня



Электромеханический поплавковый датчик уровня



Мембранный датчик уровня

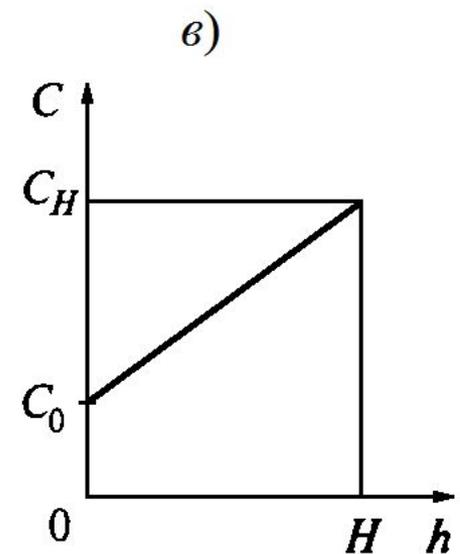
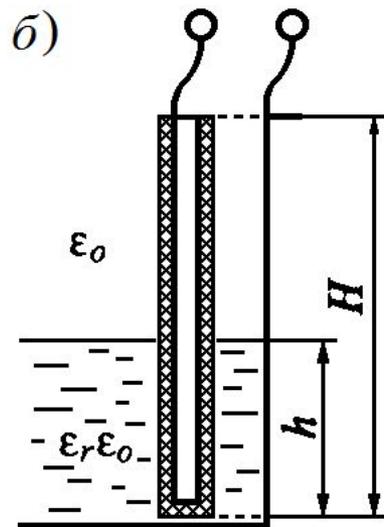
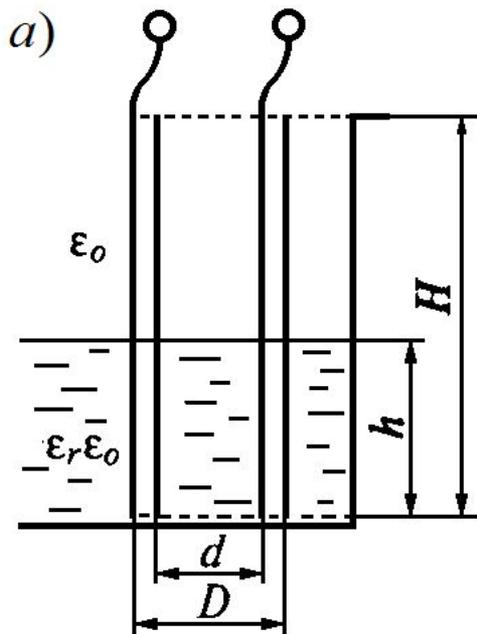


Ёмкостной цилиндрический датчик уровня

а) для диэлектрических жидкостей;

б) для проводящих жидкостей;

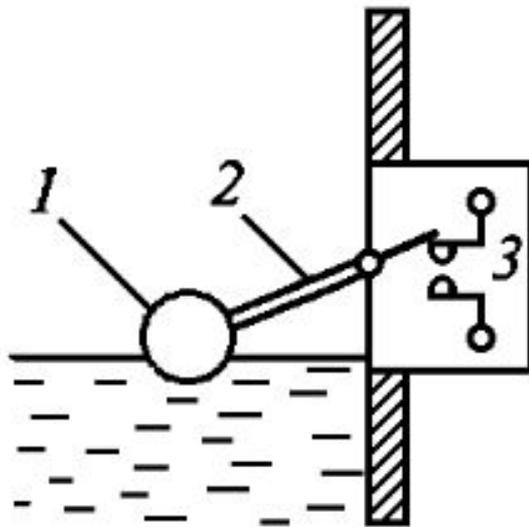
в) зависимость ёмкости от уровня



$$C = C_1 + C_2 = \frac{2\pi\epsilon_0(H-h)}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)} + \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r h}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)} [H + h(\epsilon_r - 1)]$$

Поплавковый сигнализатор уровня рычажного типа

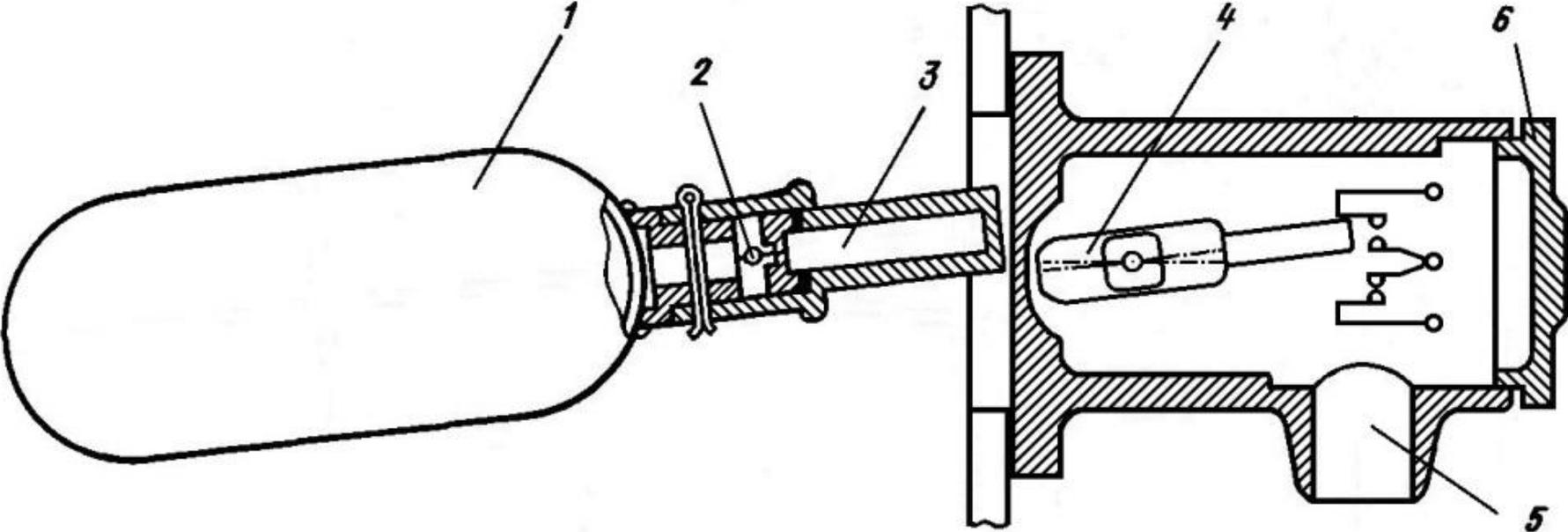
Принцип действия



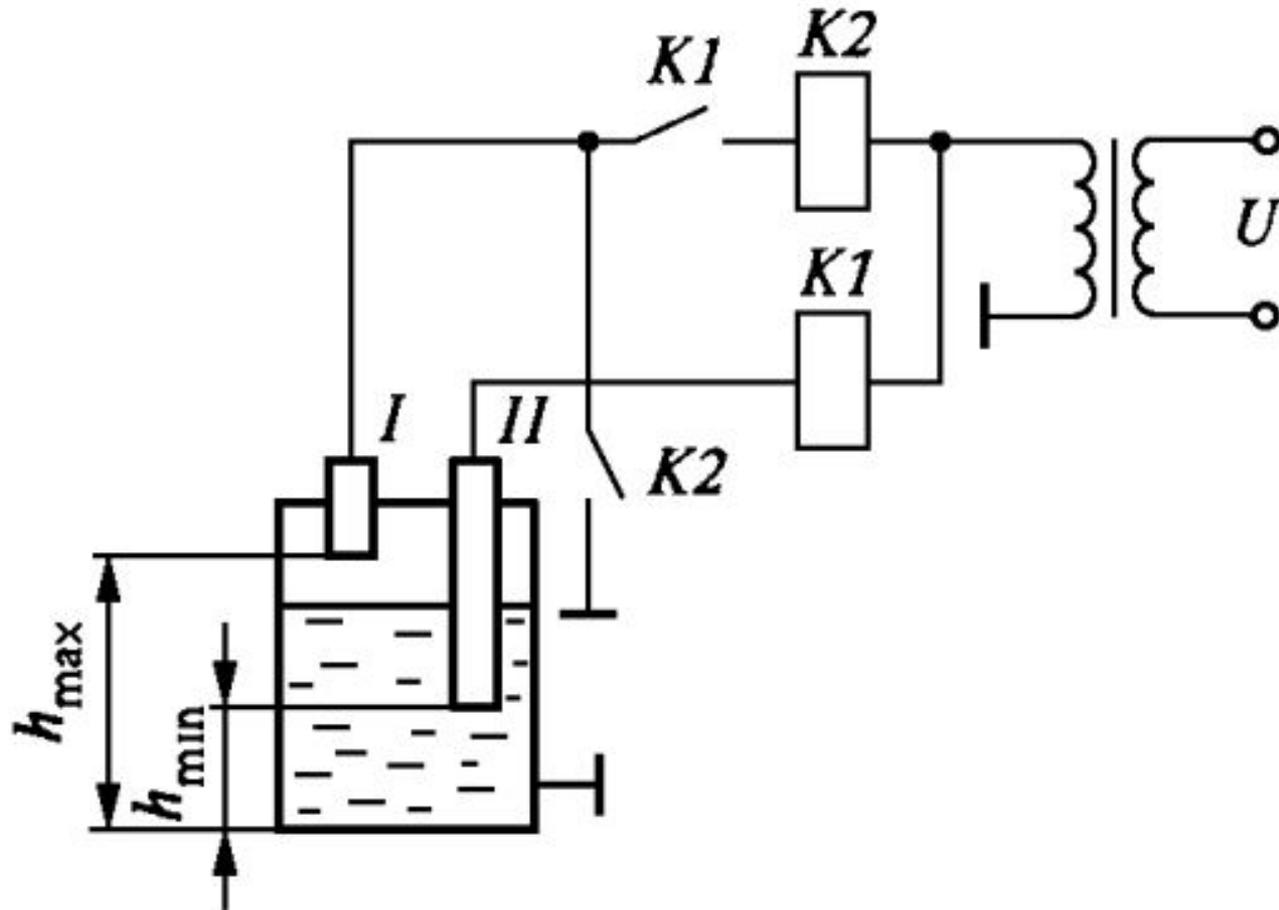
Внешний вид
сигнализатора «Mobrey»



Устройство сигнализатора «Mobrey»



Омический датчик уровня проводящей жидкости



Сельсины

Сельсин – специальная электрическая машина переменного тока, предназначенная для дистанционной синхронной передачи угла поворота или вращения.

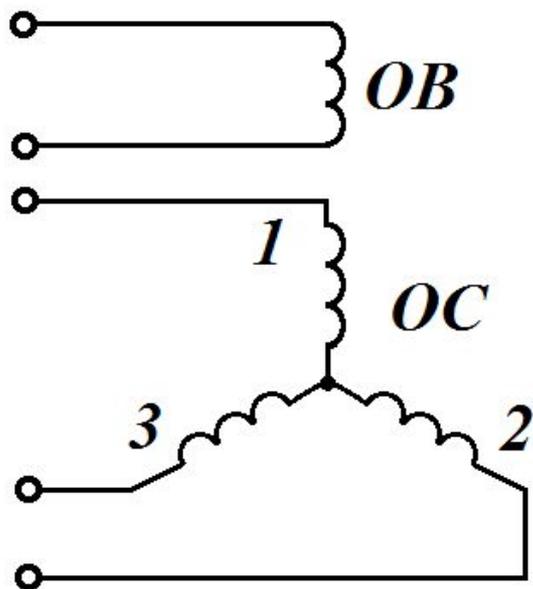
Обмотка возбуждения: однофазная или трехфазная.

Обмотка синхронизации: трехфазная.

Режимы работы сельсина:

- индикаторный: датчик поворачивается принудительно, а приемник устанавливается в согласованное с датчиком положение под воздействием собственного синхронизирующего момента;
- трансформаторный: датчик поворачивается принудительно, а приемник вырабатывает напряжение, являющееся функцией угла рассогласования между датчиком и приемником.

Электрическая схема сельсина



$$u_B = U_m \sin \omega t$$

$$\Phi_B = \Phi_m \sin (\omega t - \pi/2)$$

В исходном положении ($\alpha = 0$)

$$E_1 = E_{\text{макс}} = 4,44 f \omega \Phi_m$$

$$E_2 = E_{\text{макс}} \cos 120^\circ = -E_{\text{макс}} / 2$$

$$E_3 = E_{\text{макс}} \cos 240^\circ = -E_{\text{макс}} / 2$$

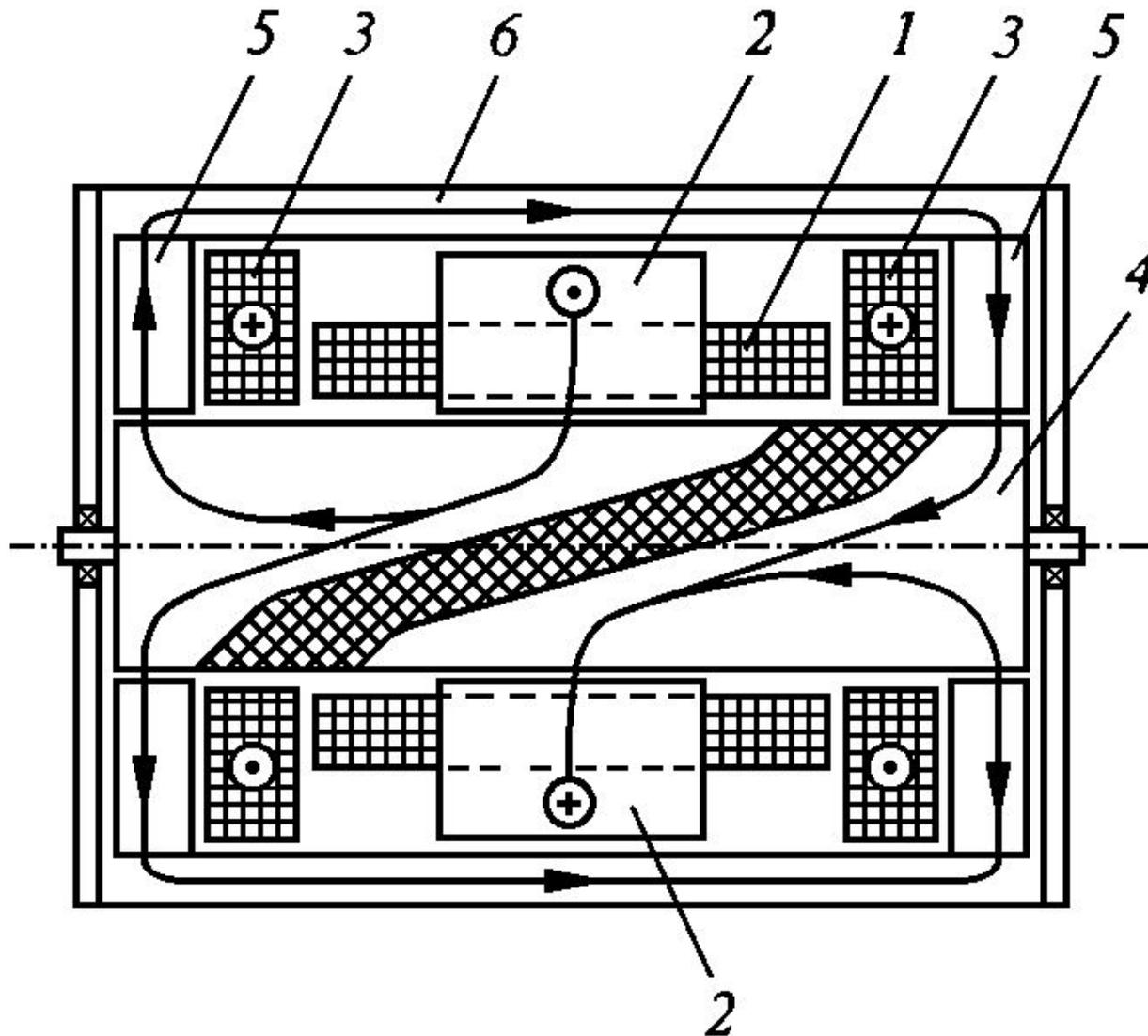
При повороте ротора на угол α

$$E_1 = E_{\text{макс}} \cos \alpha;$$

$$E_2 = E_{\text{макс}} \cos (\alpha + 120^\circ);$$

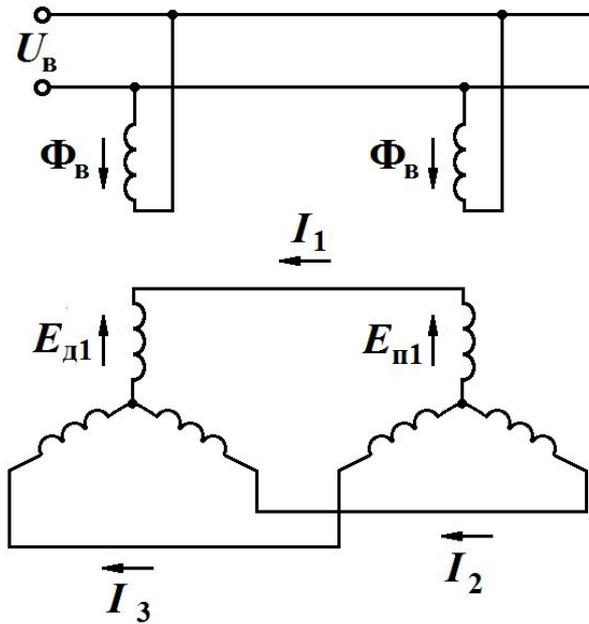
$$E_3 = E_{\text{макс}} \cos (\alpha + 240^\circ)$$

Бесконтактный сельсин



Индикаторный режим работы сельсина

Схема соединения сельсинов



ЭДС датчика

$$E_{д1} = E_{\text{макс}} \cos \alpha_{д};$$

$$E_{д2} = E_{\text{макс}} \cos (\alpha_{д} + 120^{\circ});$$

$$E_{д3} = E_{\text{макс}} \cos (\alpha_{д} + 240^{\circ})$$

ЭДС приемника

$$E_{п1} = E_{\text{макс}} \cos \alpha_{п};$$

$$E_{п2} = E_{\text{макс}} \cos (\alpha_{п} + 120^{\circ});$$

$$E_{п3} = E_{\text{макс}} \cos (\alpha_{п} + 240^{\circ})$$

Результирующие ЭДС фаз

$$E_1 = 2E_{\text{макс}} \sin \left(\frac{\alpha_{д} + \alpha_{п}}{2} \right) \sin \frac{\theta}{2};$$

$$E_2 = 2E_{\text{макс}} \sin \left(\frac{\alpha_{д} + \alpha_{п}}{2} + 120^{\circ} \right) \sin \frac{\theta}{2};$$

$$E_3 = 2E_{\text{макс}} \sin \left(\frac{\alpha_{д} + \alpha_{п}}{2} + 240^{\circ} \right) \sin \frac{\theta}{2}.$$

Определение токов

Уравнения для контуров токов

$$U_{0п} = E_{1д} - E_{1п} + I_1 \underline{2Z};$$

$$U_{0п} = E_{2д} - E_{2п} + I_2 \underline{2Z};$$

$$U_{0п} = E_{3д} - E_{3п} + I_3 \underline{2Z},$$

Сумма уравнений

$$3U_{0п} = E_{1д} + E_{2д} + E_{3д} - (E_{1п} + E_{2п} + E_{3п}) + (I_1 + I_2 + I_3) \underline{2Z}.$$

Вывод: потенциал нейтрали приемника $U_{0п} = 0$

Токи:

$$I_1 = \frac{E_1}{\underline{2Z}} = I_{\text{макс}} \sin\left(\frac{\alpha_{д} + \alpha_{п}}{2}\right) \sin \frac{\theta}{2};$$

$$I_2 = \frac{E_2}{\underline{2Z}} = I_{\text{макс}} \sin\left(\frac{\alpha_{д} + \alpha_{п}}{2} + 120^\circ\right) \sin \frac{\theta}{2};$$

$$I_3 = \frac{E_3}{\underline{2Z}} = I_{\text{макс}} \sin\left(\frac{\alpha_{д} + \alpha_{п}}{2} + 240^\circ\right) \sin \frac{\theta}{2}.$$

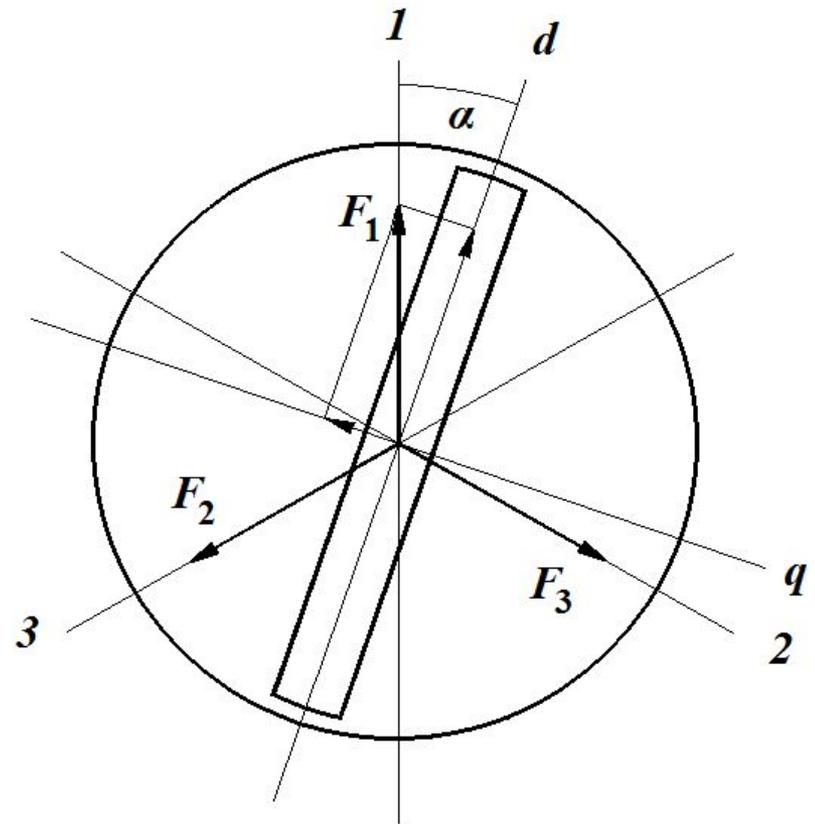
Разложение МДС на составляющие

МДС фазы

$$F_{\phi} = \frac{4\sqrt{2}}{\pi} w_{\varepsilon} I_{\phi} \approx 1,8 w_{\varepsilon} I_{\phi}$$

Продольная составляющая
МДС приемника

$$\begin{aligned} F_{d_{\Pi}} &= F_{\Pi 1} \cos \alpha_{\Pi} + F_{\Pi 2} \cos(\alpha_{\Pi} + 120^{\circ}) + F_{\Pi 3} \cos(\alpha_{\Pi} - 120^{\circ}) = \\ &= 1,8 w_{\varepsilon} [I_1 \cos \alpha_{\Pi} + I_2 \cos(\alpha_{\Pi} + 120^{\circ}) + I_3 \cos(\alpha_{\Pi} - 120^{\circ})] = 1,8 w_{\varepsilon} I_{d_{\Pi}} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
I_{d\Pi} &= -I_{\text{макс}} \sin \frac{\theta}{2} \left[\sin \frac{\alpha_{\text{д}} + \alpha_{\text{п}}}{2} \cos \alpha_{\text{п}} + \sin \left(\frac{\alpha_{\text{д}} + \alpha_{\text{п}}}{2} + 120^\circ \right) \cos(\alpha_{\text{п}} + 120^\circ) + \right. \\
&\quad \left. + \sin \left(\frac{\alpha_{\text{д}} + \alpha_{\text{п}}}{2} - 120^\circ \right) \cos(\alpha_{\text{п}} - 120^\circ) \right] = \\
&= -\frac{1}{2} I_{\text{макс}} \sin \frac{\theta}{2} \left[\sin \frac{3\alpha_{\text{д}} + \alpha_{\text{п}}}{2} + \sin \frac{\alpha_{\text{д}} - \alpha_{\text{п}}}{2} + \sin \left(\frac{3\alpha_{\text{д}} + \alpha_{\text{п}}}{2} + 240^\circ \right) + \sin \frac{\alpha_{\text{д}} - \alpha_{\text{п}}}{2} + \right. \\
&\quad \left. + \sin \left(\frac{3\alpha_{\text{д}} + \alpha_{\text{п}}}{2} - 240^\circ \right) + \sin \frac{\alpha_{\text{д}} - \alpha_{\text{п}}}{2} \right] = -\frac{3}{2} I_{\text{макс}} \sin^2 \frac{\theta}{2} = -\frac{3}{4} I_{\text{макс}} (1 - \cos \theta).
\end{aligned}$$

$$F_{d\Pi} = 1,8 w_{\vartheta} I_{d\Pi} = -\frac{3}{4} F_{\text{макс}} (1 - \cos \theta)$$

Поперечная составляющая МДС

$$F_{q\Pi} = F_{\Pi 1} \sin \alpha_{\Pi} + F_{\Pi 2} \sin(\alpha_{\Pi} + 120^\circ) + F_{\Pi 3} \sin(\alpha_{\Pi} - 120^\circ) = \\ = 1,8w_3 [I_1 \sin \alpha_{\Pi} + I_2 \sin(\alpha_{\Pi} + 120^\circ) + I_3 \sin(\alpha_{\Pi} - 120^\circ)] = 1,8w_3 I_{q\Pi}.$$

$$I_{q\Pi} = -I_{\text{макс}} \sin \frac{\theta}{2} \left[\sin \frac{\alpha_{\text{д}} + \alpha_{\Pi}}{2} \sin \alpha_{\Pi} + \sin \left(\frac{\alpha_{\text{д}} + \alpha_{\Pi}}{2} + 120^\circ \right) \sin(\alpha_{\Pi} + 120^\circ) + \right. \\ \left. + \sin \left(\frac{\alpha_{\text{д}} + \alpha_{\Pi}}{2} - 120^\circ \right) \sin(\alpha_{\Pi} - 120^\circ) \right] =$$

$$= -\frac{1}{2} I_{\text{макс}} \sin \frac{\theta}{2} \left[\cos \frac{\alpha_{\text{д}} - \alpha_{\Pi}}{2} - \cos \frac{\alpha_{\text{д}} + 3\alpha_{\Pi}}{2} + \cos \frac{\alpha_{\text{д}} - \alpha_{\Pi}}{2} - \cos \left(\frac{\alpha_{\text{д}} + 3\alpha_{\Pi}}{2} + 240^\circ \right) + \right. \\ \left. + \cos \frac{\alpha_{\text{д}} - \alpha_{\Pi}}{2} - \cos \left(\frac{\alpha_{\text{д}} + 3\alpha_{\Pi}}{2} - 240^\circ \right) \right] = -\frac{3}{2} I_{\text{макс}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} = -\frac{3}{4} I_{\text{макс}} \sin \theta.$$

$$F_{q\Pi} = 1,8w_3 I_{q\Pi} = -\frac{3}{4} F_{\text{макс}} \sin \theta.$$

Определение синхронизирующего момента

Мгновенное значение синхронизирующего момента

$$m_{c.п} = c \Phi_B f_{qп}$$

где c – конструктивная постоянная;

Φ_B – мгновенное значение потока обмотки возбуждения;

$$f_{qп} = \sqrt{2} \frac{3}{4} F_{\text{макс}} \sin \theta \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \psi \right).$$

$$\begin{aligned} \text{Тогда } m_{c.п} &= c \Phi_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \sqrt{2} \frac{3}{4} F_{\text{макс}} \sin \theta \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \psi \right) = \\ &= c \Phi_m \sqrt{2} \frac{3}{4} F_{\text{макс}} \sin \theta \frac{1}{2} [\cos \psi - \cos(2\omega t - \pi - \psi)]. \end{aligned}$$

Среднее значение синхронизирующего момента

$$M_c = c \Phi_m \sqrt{2} \frac{3}{8} F_{\text{макс}} \cos \psi \sin \theta = M_m \sin \theta.$$

Трансформаторный режим работы

Токи фаз:

$$I_1 = \frac{E_1}{2\underline{Z}} = I_{\text{макс}} \cos \alpha_{\text{д}};$$

$$I_2 = \frac{E_2}{2\underline{Z}} = I_{\text{макс}} \cos(\alpha_{\text{д}} + 120^\circ);$$

$$I_3 = \frac{E_3}{2\underline{Z}} = I_{\text{макс}} \cos(\alpha_{\text{д}} - 120^\circ).$$

Продольная составляющая МДС:

$$F_{d\Pi} = -\frac{3}{2} F_{\text{макс}} \cos \theta.$$

Поперечная составляющая МДС:

$$F_{q\Pi} = \frac{3}{2} F_{\text{макс}} \sin \theta.$$

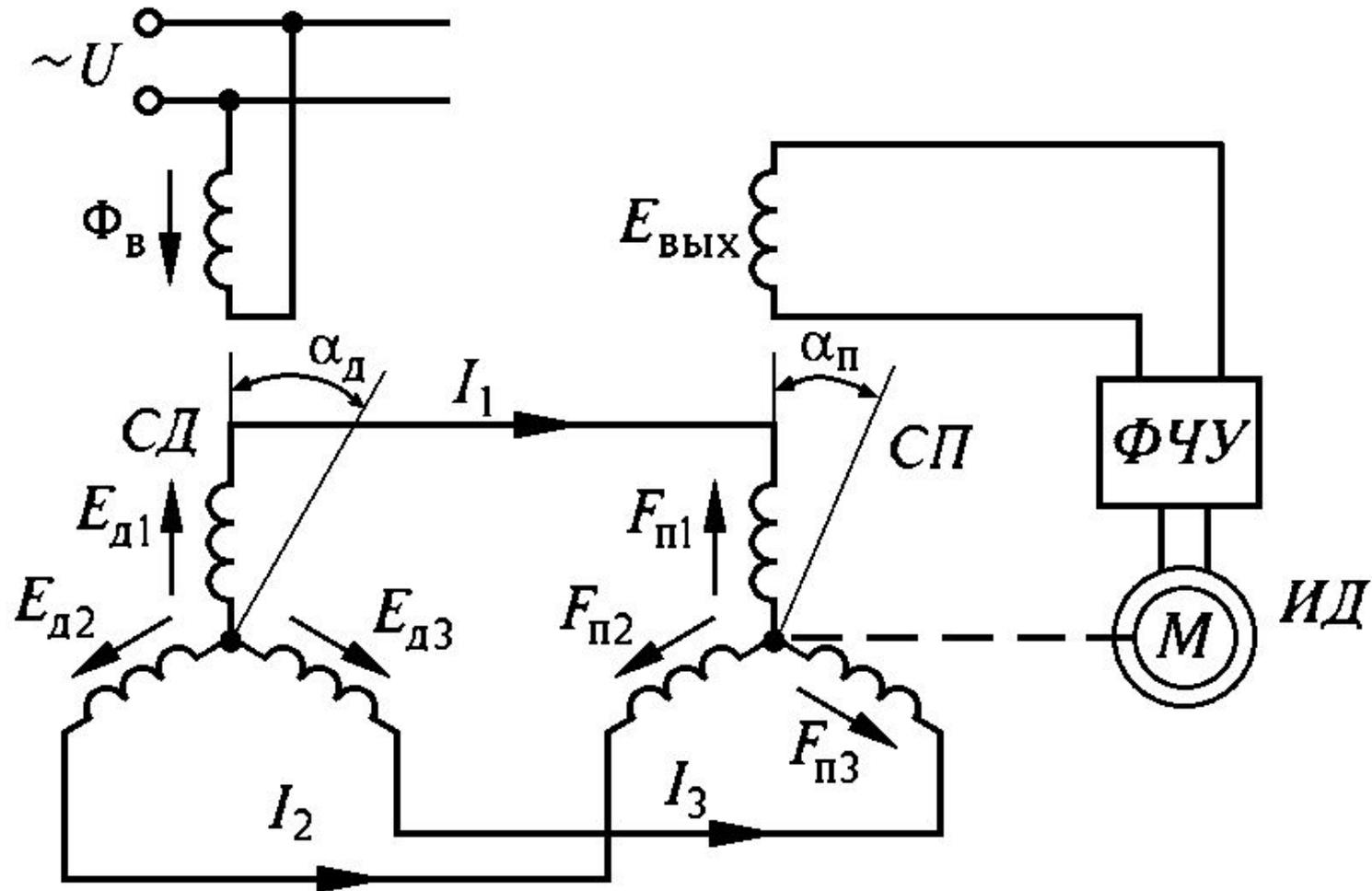
Выходная ЭДС:

$$E_{\text{ВЫХ}} = E_{\text{ВЫХ.МАКС}} \cos \theta.$$

Выходная ЭДС с учетом сдвига:

$$E_{\text{ВЫХ}} = E_{\text{ВЫХ.МАКС}} \sin \theta.$$

Следящая система с сельсинами в трансформаторном режиме

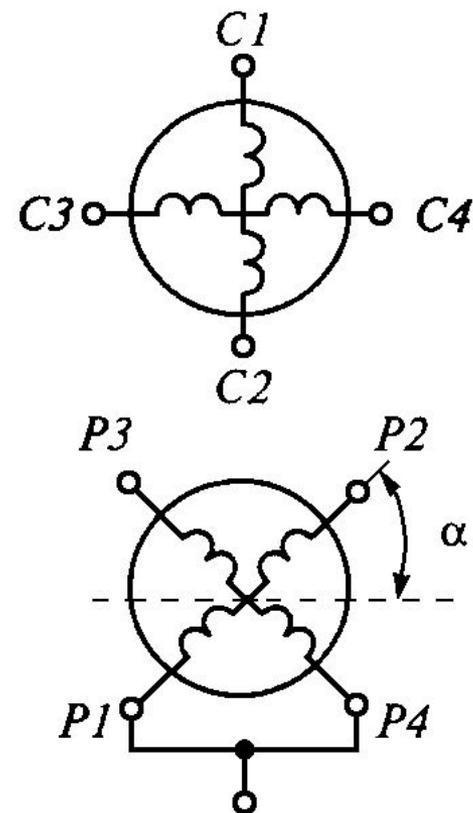


Вращающиеся трансформаторы

Вращающийся трансформатор (ВТ) – электрическая микромашина переменного тока, служащая для преобразования угла поворота ротора в напряжение. В зависимости от закона изменения выходного напряжения ВТ подразделяются на следующие типы:

- синусно-косинусные ВТ (СКВТ): два выходных напряжения, одно из которых пропорционально синусу угла поворота ротора, а другое – косинусу угла;
- линейные ВТ (ЛВТ): выходное напряжение изменяется по закону, близкому к линейному, в определенном диапазоне изменения угла;
- масштабные ВТ: выходное напряжение изменяется пропорционально входному, а коэффициент пропорциональности определяется углом поворота ротора

Схема ВТ:



Синусно-косинусный

ВТ

Работа СКВТ при холостом ходе

$$E_B = 4,44 f w_{c.э} \Phi_{dm}$$

$$E_{s0} = 4,44 f w_{p.э} \Phi_{dm} \sin \alpha$$

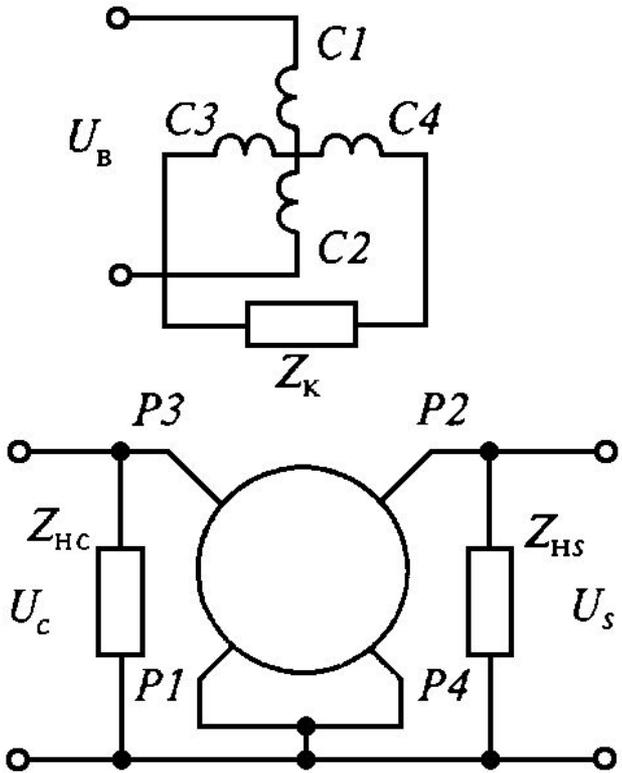
$$E_{c0} = 4,44 f w_{p.э} \Phi_{dm} \cos \alpha$$

$$E_{s0} = k E_B \sin \alpha; \quad E_{c0} = k E_B \cos \alpha,$$

где $k = w_{p.э} / w_{c.э}$ – коэффициент трансформации СКВТ.

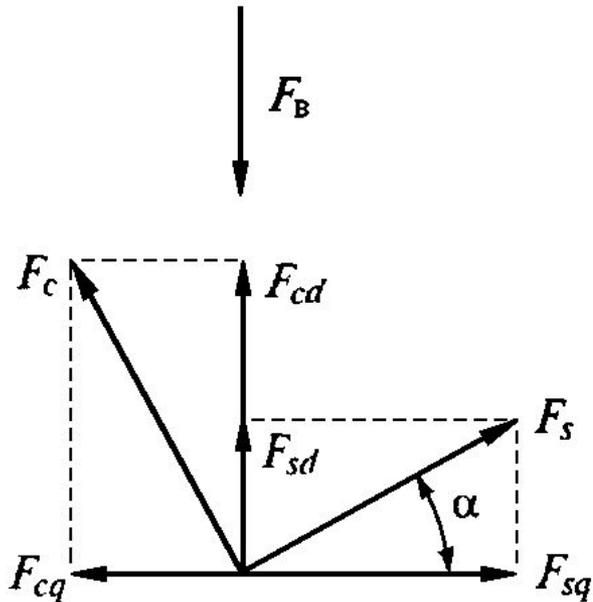
Работа СКВТ при нагрузке

$$I_s^{\square} = \frac{E_s^{\square}}{Z_s + Z_{HS}} \quad I_s^{\square} = \sqrt{2} I_s w_{p.э}$$



Работа СКВТ при нагрузке

Разложение МДС
синусной обмотки
по осям



$$F_{sd} = F_s \sin \alpha; \quad F_{sq} = F_s \cos \alpha.$$

Поперечная составляющая потока

$$\Phi_{sqm} = \frac{F_{sq} \cos \alpha}{R_M}$$

ЭДС самоиндукции синусной обмотки

$$E_{sq} = 4,44 f w_{p.э} \Phi_{sqm} \cos \alpha = 4,44 f w_{p.э} \frac{F_{sq} \cos \alpha}{R_M} \cos^2 \alpha$$

Выражая F через I , а I через E_s , получаем:

$$E_{sq} = -jx_s \frac{E_s \cos^2 \alpha}{Z_s + Z_{HS}}$$

Полная ЭДС синусной обмотки

$$E_s = k E_B \sin \alpha - jx_s \frac{E_s \cos^2 \alpha}{Z_s + Z_{HS}}$$

Отсюда находим ЭДС синусной обмотки:

$$E_s = \frac{k E_B \sin \alpha}{1 + jx_s \frac{\cos^2 \alpha}{Z_s + Z_{HS}}}$$

Линейный

ВТ

Использование зависимости $\sin \alpha \approx \alpha$

$\alpha, ^\circ$	1	2	4,5	7
$\delta, \%$	0,005	0,02	0,1	0,25

Аппроксимация зависимостью $f(\alpha) = \frac{\sin \alpha}{1 + k \cos \alpha}$

При $-60^\circ < \alpha < 60^\circ$ $k = 0,536$.

Напряжение сети

$$U_B = -E_B + E_c = 4,44 f w_{c.э} \Phi_{dm} + 4,44 f w_{p.э} \Phi_{dm} \cos \alpha$$

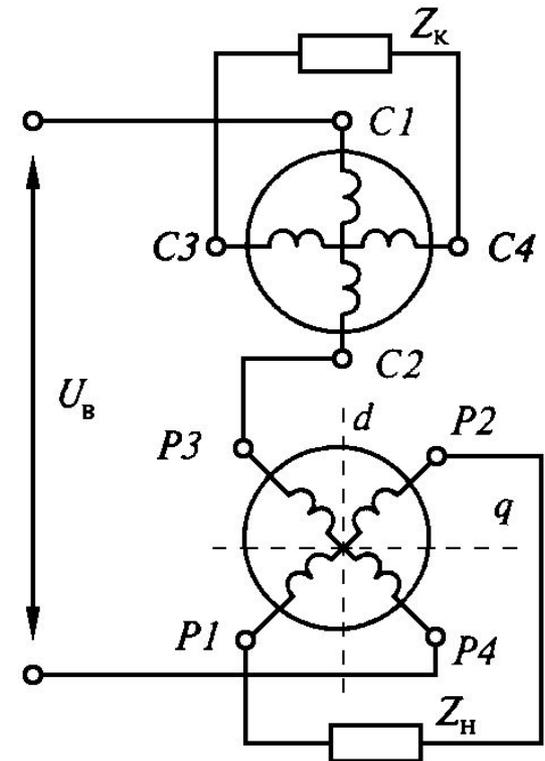
Отсюда магнитный поток

$$\Phi_{dm} = - \frac{U_B}{4,44 f (w_{c.э} + w_{p.э} \cos \alpha)}$$

ЭДС синусной обмотки

$$E_s = 4,44 f w_{p.э} \Phi_{dm} \sin \alpha = - \frac{w_{p.э} U_B \sin \alpha}{w_{c.э} + w_{p.э} \cos \alpha} = - \frac{k U_B \sin \alpha}{1 + k \cos \alpha}$$

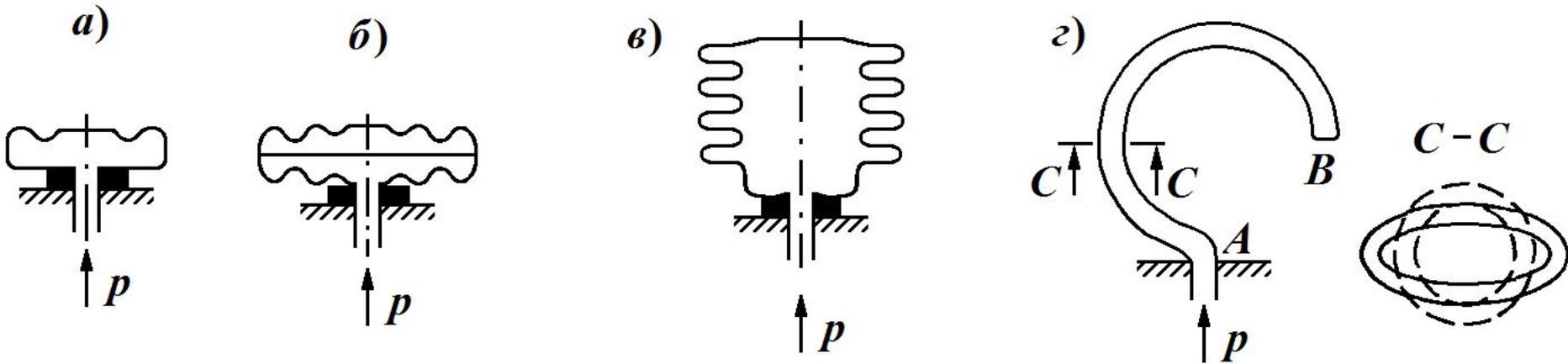
ЛВТ с первичным симметрированием



Датчики давления

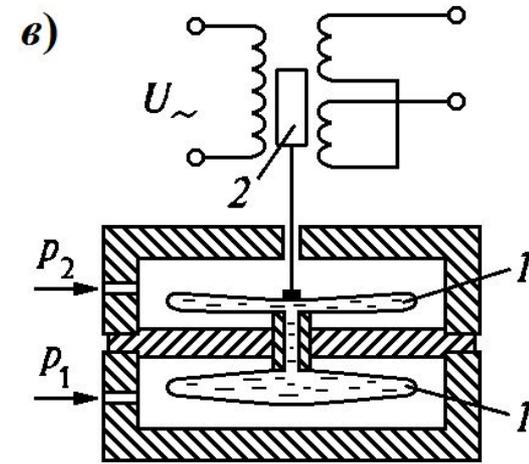
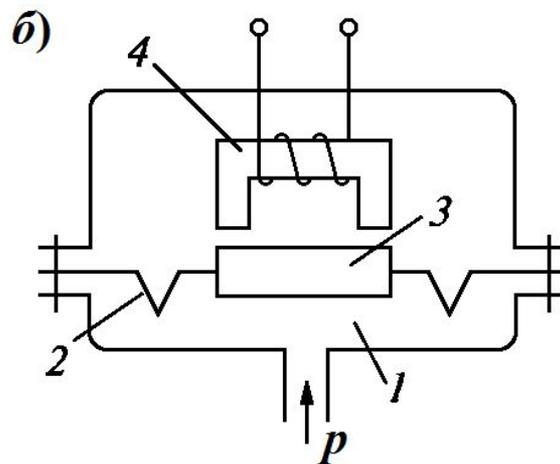
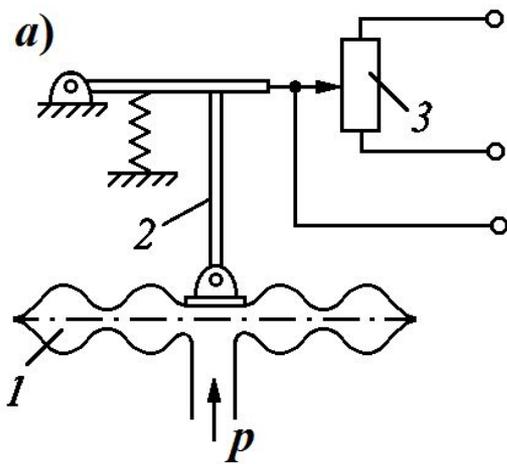
Упругие чувствительные элементы:

- а) мембрана;
- б) мембранная коробка;
- в) сильфон;
- г) трубка Бурдона



Примеры датчиков давления

- а) с потенциометрическим преобразователем;
- б) с индуктивным преобразователем;
- в) дифференциальный датчик давления.



Электроконтактный манометр



Датчики расхода

Расход – объем или масса вещества, проходящие через определенное сечение в единицу времени.

Датчики расхода делятся на расходомеры и счетчики.

Наибольшее применение нашли:

- расходомеры переменного и постоянного перепада давления;
- объемные счетчики и расходомеры;
- тахометрические расходомеры ;
- электромагнитные (индукционные) расходомеры.

Расходомеры переменного перепада давления

Уравнение Бернулли

$$\frac{p'_1}{\rho} + \frac{w_1^2}{2} = \frac{p'_2}{\rho} + \frac{w_2^2}{2} \quad (1)$$

Уравнение неразрывности струи

$$F_1 w_1 = F_2 w_2 \quad (2)$$

$$F_2 = \mu F_0 \quad (3)$$

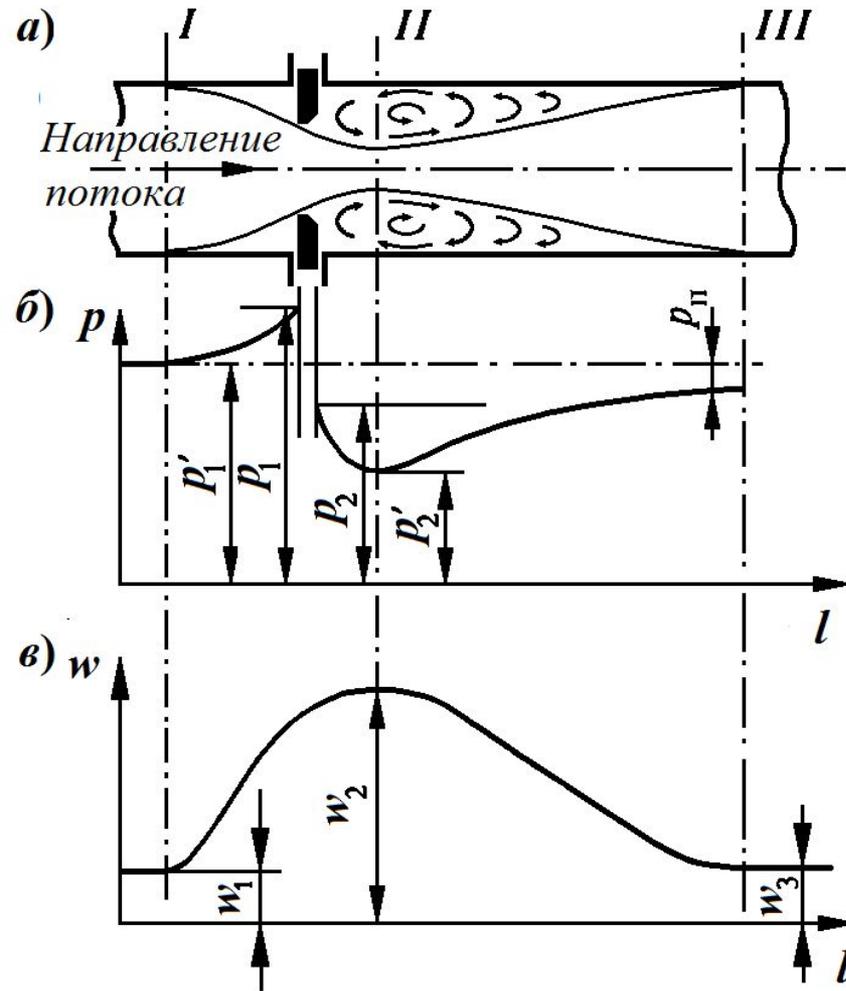
Из (1 – 3) получаем

$$w_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - m^2 \mu^2}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (p'_1 - p'_2)},$$

где $m = F_0 / F_1$.

При измерении давления у диафрагмы

$$w_2 = \frac{\varepsilon}{\sqrt{1 - m^2 \mu^2}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2)}$$



Объемный расход несжимаемой жидкости

$$Q = w_2 F_2 = \frac{\mu \varepsilon F_0}{\sqrt{1 - m^2 \mu^2}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2)} = \alpha F_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2)}$$

Массовый расход

$$Q_m = \rho Q = \alpha F_0 \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)}$$

Достоинство расходомеров переменного перепада давления – сравнительно высокая точность измерения.

Недостатки:

- потеря энергии потока;
- трудность измерения в пульсирующих потоках и при наличии примеси

Расходомеры постоянного перепада давления

Сила тяжести поплавка

$$P = V_{\Pi} g (\rho_{\Pi} - \rho)$$

Подъемная сила

$$R = (p_1 - p_2) F_0$$

В установившемся режиме $P = R$, поэтому

$$p_1 - p_2 = \Delta p = \frac{V_{\Pi} g (\rho_{\Pi} - \rho)}{F_0}$$

Скорость протекания жидкости

$$w = \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2)},$$

откуда

$$\Delta p = \frac{w^2 \rho}{2}$$

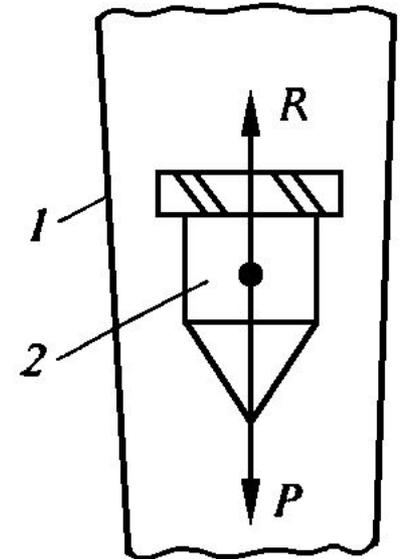
Приравнивая два выражения для Δp , получаем:

$$w = \sqrt{\frac{2V_{\Pi} g (\rho_{\Pi} - \rho)}{\rho F_0}}$$

Объемный расход

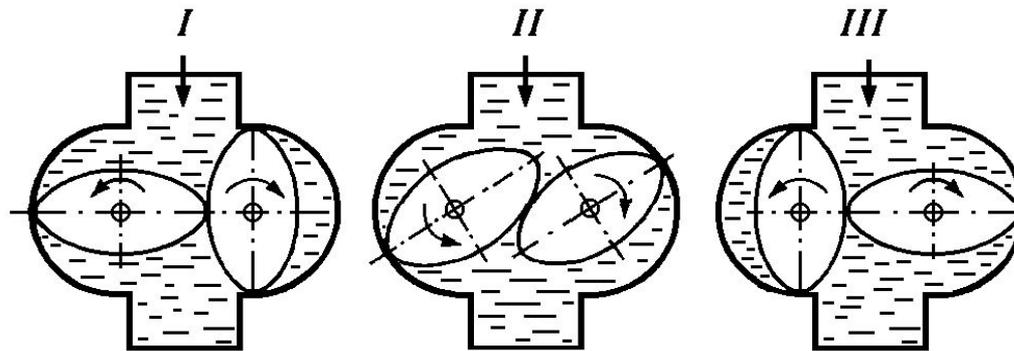
$$Q = \alpha w F_{\kappa}$$

Так как практически $w = \text{const}$, то Q пропорционально высоте подъема поплавка

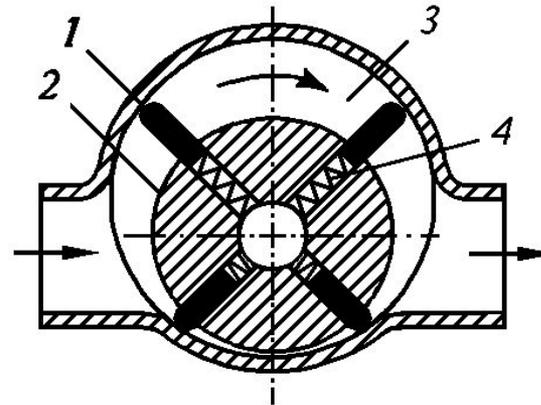


Объемные счетчики (расходомеры)

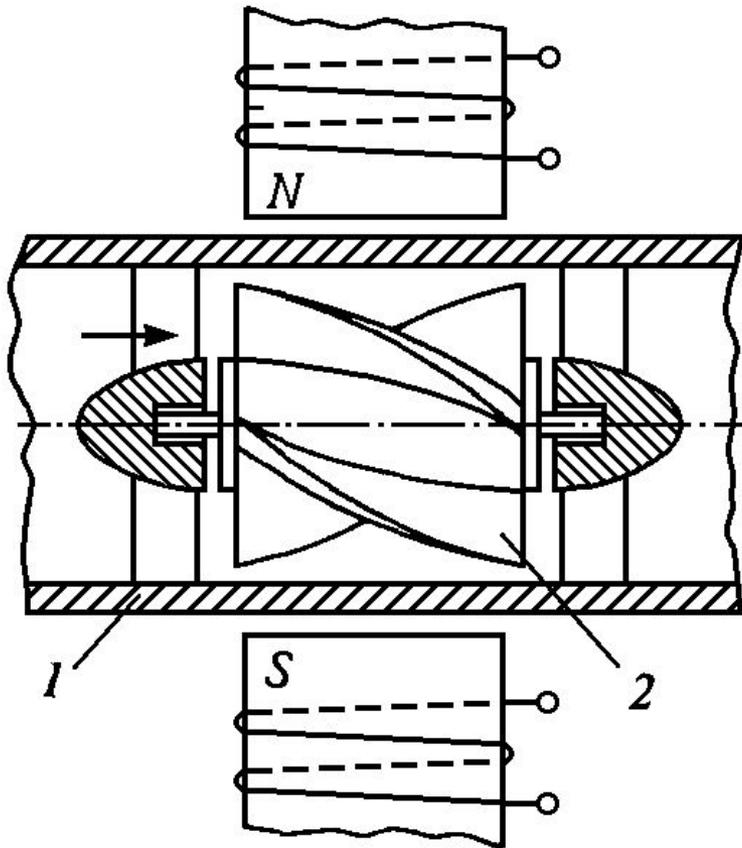
Счетчик с овальными шестернями



Лопастной счетчик



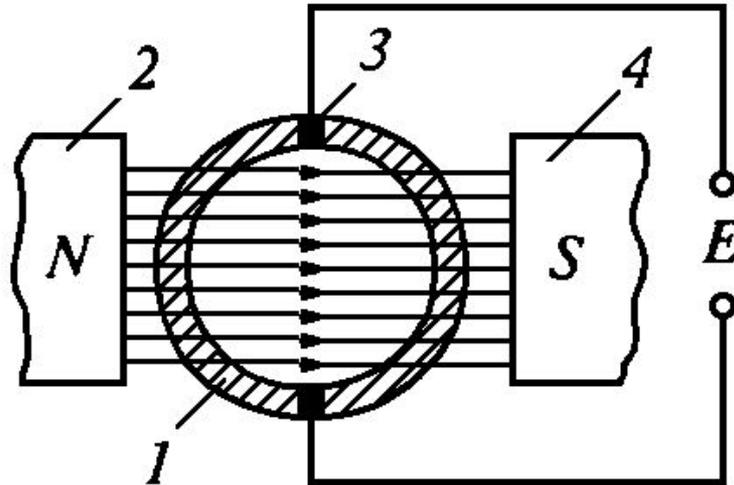
Тахометрические расходомеры



Угловая скорость
крыльчатки

$$\omega = c\omega = c \frac{Q}{F}$$

Электромагнитные (индукционные) расходомеры



ЭДС между электродами при постоянном магнитном потоке

$$e = Bdw = B \frac{4}{\pi d} Q.$$

При переменном магнитном потоке

$$e = B_m \frac{4}{\pi d} Q \sin \omega t.$$