

# “Анализ динамики движения рабочих частей КШМ.”

## “Модели гидро-, газо-, механических систем КШМ.”

- 1) Жесткая
- 2) Упруго-сосредоточенная
- 3) Упруго распределенная

Характеристики моделей:

### Жесткая модель:

а) Для твердых тел характеризуется тем, что упругая деформация равна нулю, а модуль Юнга равен бесконечности. Масса тела сосредоточена в точке.

б) Жидкостное звено: жидкость вязкая, несжимаемая, нетеплопроводная, масса сосредоточена в точке.

в) Для газового звена:  $pV^k = \text{const}$   $k=1 \dots 1,5$

Примеры применения: при теоретическом исследовании статических и динамических КШМ (молотов) на этапе разгона подвижных частей.

### Упруго-сосредоточенная модель:

а) Для твердых звеньев: упругое звено (деформация  $> 0$ , модуль Юнга постоянен, масса сосредоточена в точке)

б) Жидкостное звено: жидкость вязкая, сжимаемая, нетеплопроводная, масса сосредоточена в точке.

в) Для газового звена:  $pV^k = \text{const}$   $k=1,35 \dots 1,5$

Примеры применения: теоретическое исследование динамических машин на этапе хода деформирования.

### Упруго распределенная модель:

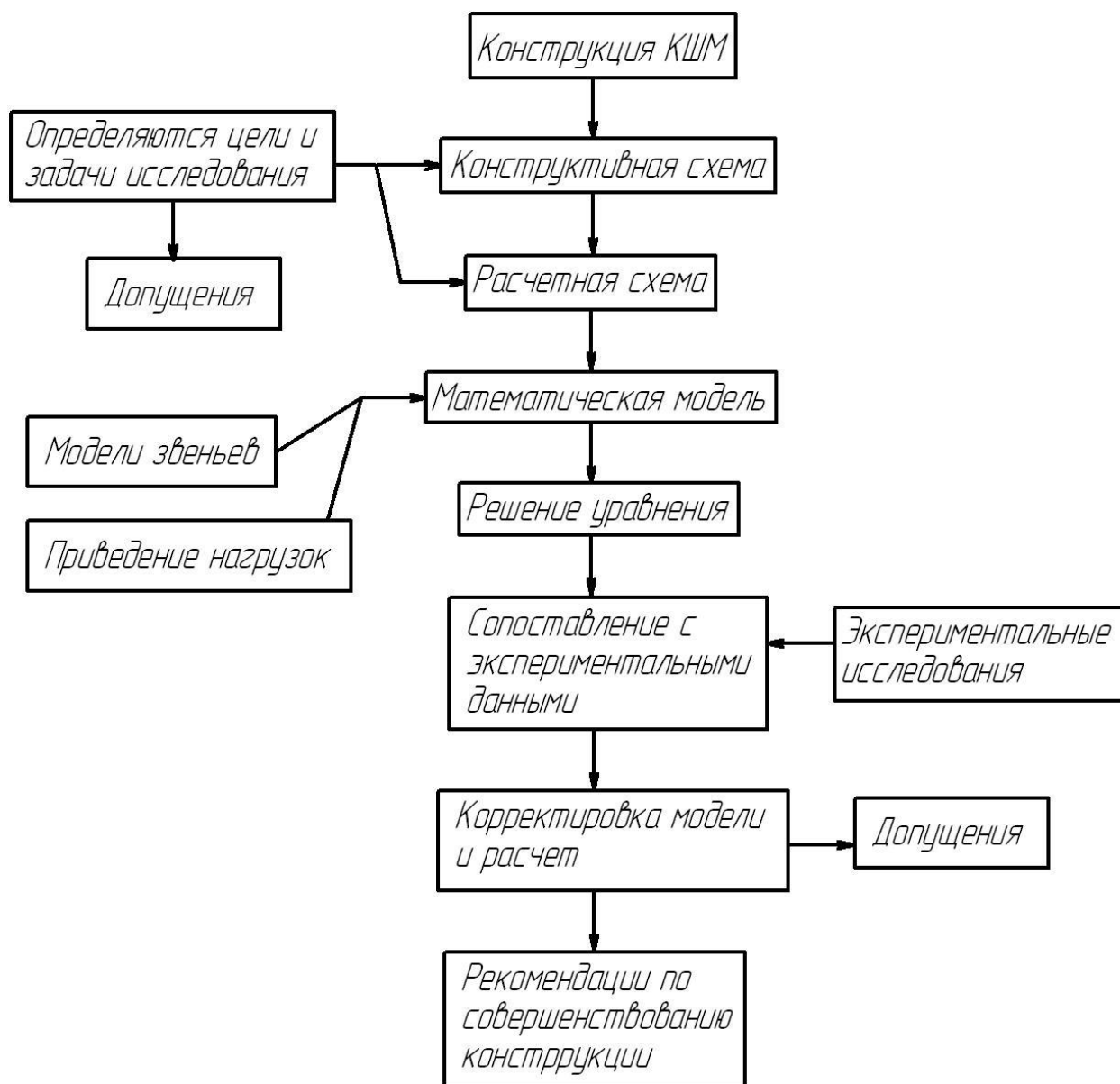
а) Для твердых звеньев: упругое твердое звено (деформация  $> 0$ , модуль Юнга постоянен, масса распределена по объему)

б) Жидкостное звено: жидкость вязкая, сжимаемая, нетеплопроводная, масса распределена по объему.

в) Для газового звена:  $pV^k = \text{const}$   $k=1,5 \dots 1,6$

Примеры применения: при исследовании ударных нагрузений звеньев КШМ.

## “Методика составления расчетных схем и моделей при теоретическом исследовании.”

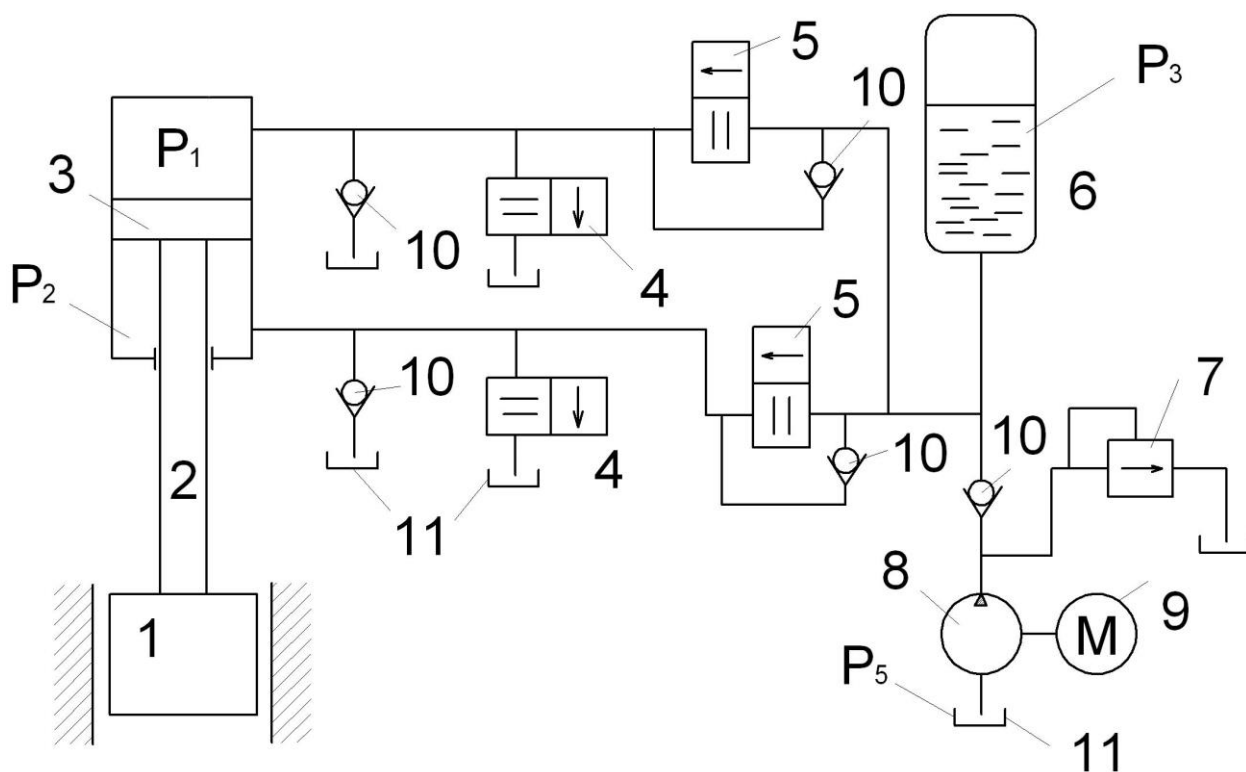


## “Анализ динамики движения рабочих частей КШМ, связанной с газовыми и гидравлическими звеньями.”

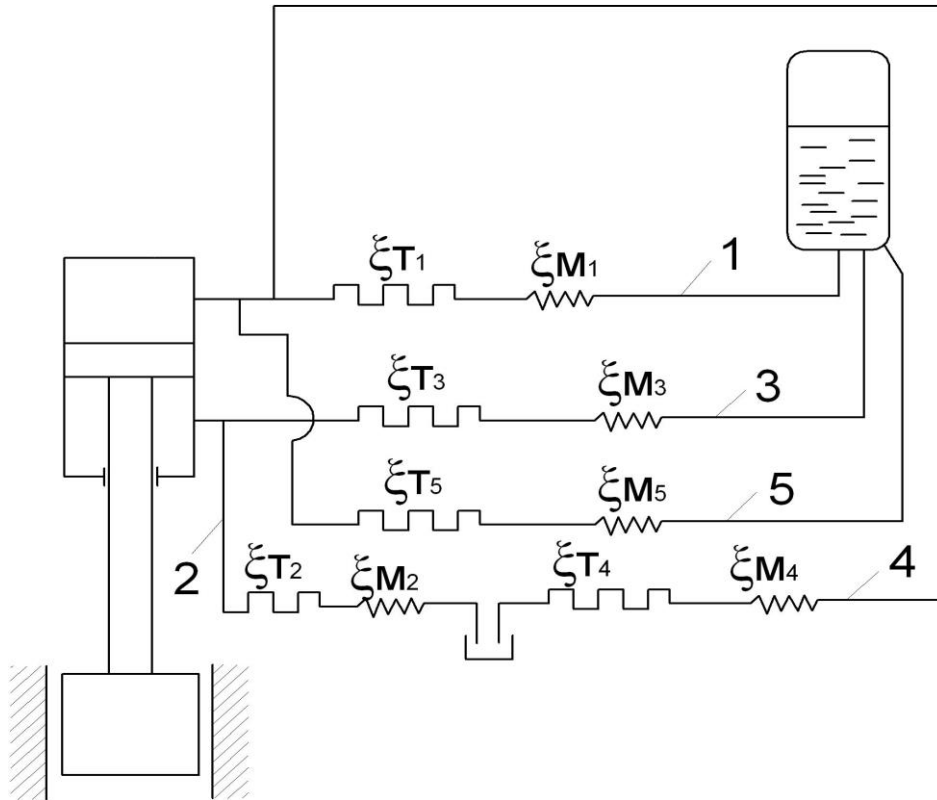
При анализе на основании жесткой модели массу рабочих частей можно представить в виде одной приведенной массы, используя закон приведения масс. Силу деформирования можно представить в виде одной силы, которая может зависеть от множества параметров: скорость движения подвижных частей, текущего положения подвижных частей, квадрата скорости.

**“Анализ динамики движения рабочих частей КШМ,  
сопряженной с гидropневматическим аккумулятором.”**

- 1- баба молота
- 2 – шток
- 3 – поршень
- 4 – сливные клапана
- 5 – напорные клапана (нагнетательные)
- 6 – гидropневматический аккумулятор
- 7 – предохранительный клапан
- 8 – насос
- 9 – электродвигатель
- 10 – обратный клапан
- 11 – сливной бак

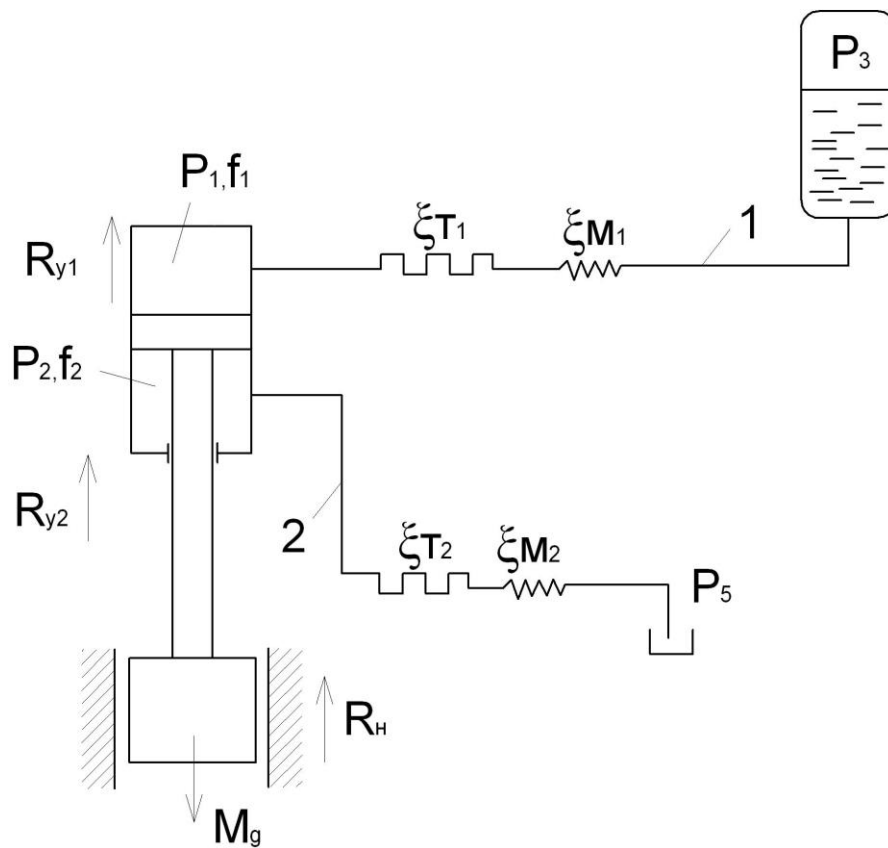


- $P_1$  – давление в поршневой полости гидроцилиндра
- $P_2$  – давление в штоковой полости гидроцилиндра
- $P_3$  – давление в аккумуляторе
- $P_4$  – давление в наполнительном баке
- $P_5$  – давление в сливном баке



Третья с шестой магистралью совпадают по направлению, но не по смыслу.

### Анализ хода разгона вниз:



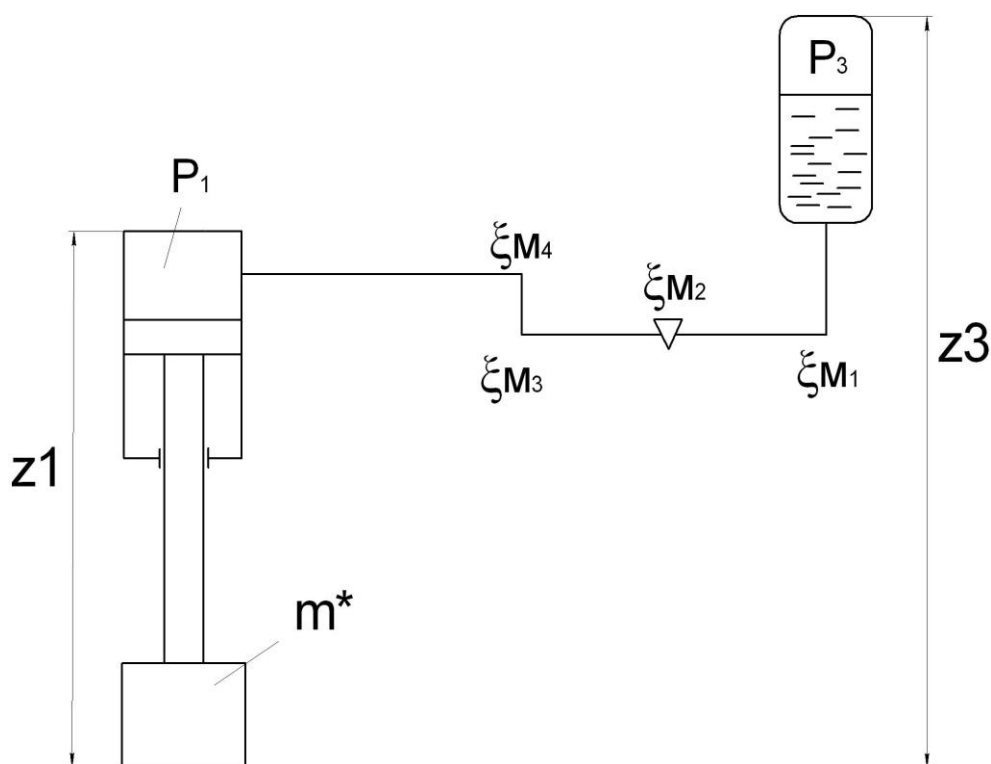
$$m^* \frac{dV}{dt} = p_1 \times f_1 + m^* \times g - p_2 \times f_2 - R_H - R_{y1} - R_{y2}$$

$$R_H = 0,1m^* \times g \quad R_{y1} = 0,03p_1 \times f_1 \quad R_{y2} = 0,03p_2 \times f_2$$

Задача решения этого уравнения сводится к отысканию  $p_1$  и  $p_2$ . Они определяются из:

- 1) Уравнения Бернулли
- 2) Из условий неразрывности потока жидкости в магистрали.

**“Расчетная схема для установления взаимосвязи давления в рабочем цилиндре и аккумуляторе.”**



Допущения:

- 1) Жидкость несжимаема
- 2) Жидкость вязкая
- 3) Трубопровод не деформируется
- 4) Имеется полный теплообмен
- 5)  $P_3$  и  $P_5$  постоянны (давление в аккумуляторе и сливном баке)

Уравнение Бернулли:

$$Z_3 + \frac{P_3}{\gamma} + \frac{V_3^2}{2 \cdot g} = Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} + \sum h_T + \sum h_m + \sum h_u$$

$Z_1, Z_3$  - геометрический напор,

$\frac{P}{\gamma}$  - пьезометрический напор,

$\frac{V^2}{2 \cdot g}$  - скоростной напор,

$\sum h_T$  - потери давления на трение,

$\sum h_m$  - потери давления на местных сопротивлениях,

$\sum h_u$  - потери давления на разгон/торможение.

Потери на трение по длине трубопровода:

$$\sum h_T = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \frac{l_i}{d_i} \cdot \frac{V_i^2}{2 \times g}$$

Потери давления на местные сопротивления:

$$\sum h_m = \sum_{i=1}^n \xi_i \cdot \frac{V_i^2}{2 \times g}$$

$\xi$  - коэффициент гидравлического сопротивления

$\xi = 0,18 \dots 0,5$  - изгиб трубопровода

$\xi = 2 \dots 3$  - обратный клапан

$\xi = 2,5 \dots 5$  - вентиль

$\xi = 2$  - угольник

Потери давления на инерционный напор:

$$\sum_{q=1}^n h_u = \frac{l_q}{g} \times \frac{dV_q}{dt}$$

Уравнение неразрывности потока определяется одинаковым прохождением объема жидкости в различных сечениях трубопровода.

$$V_3 f_3 = V_1 f_1 = V_i f_i ; \quad V_i = V_1 f_1 / f_3$$

$$\frac{P_1}{\gamma} = \frac{P_3}{\gamma} - \left( \frac{V_1^2}{2 \cdot g} - \frac{V_3^2}{2 \cdot g} \right) - \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \frac{V_i^2}{2 \cdot g} - \sum_{j=1}^m \xi_j \cdot \frac{V_j^2}{2 \cdot g} \pm \sum_{q=1}^n \frac{l_q}{g} \cdot \frac{dV_q}{dt}$$

$$P_1 = P_3 - \frac{V_1^2}{2} \cdot \rho - \frac{\rho}{2} \cdot \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \frac{l_i}{d_i} \cdot \left(\frac{f_1}{f_i}\right)^2 V_1^2 + \frac{V_1^2 \left(\frac{f_1}{f_3}\right)^2}{2} \cdot \rho ; \quad \rho = \frac{\gamma}{g}$$

$\frac{V_1^2}{2} \cdot \rho = U_1$  - коэффициент, сопротивления, учитывающий скоростной напор жидкости.

$\frac{\rho}{2} \cdot \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \frac{l_i}{d_i} \cdot \left(\frac{f_1}{f_i}\right)^2 = \xi_{T1}$  - приведенный коэффициент сопротивления по прямолинейным участкам трубопровода.

$\frac{\rho}{2} \times \sum_{j=1}^m \xi_j \times \left(\frac{f_1}{f_i}\right) = \xi_{M1}$  - приведенный коэффициент местного сопротивления.

$\rho \times \sum_{q=1}^n l_q \times \left(\frac{f_1}{f_i}\right) \times \frac{dV_1}{dt} = I_1$  - приведенный коэффициент сопротивления, учитывающий инерционный напор.

$$P_1 = P_3 - (u_1 + \xi_{T1} + \xi_{M1})V_1^2 \pm I_1 \times \frac{dV}{dt}$$

$$P_1 = P_3 - \xi_1 \cdot V_1^2 - I_1 \cdot \frac{dV}{dt}$$

$\xi_1$  - приведенный коэффициент сопротивления скоростному напору по длине и местным сопротивлениям магистрали. (суммарный)

$$P_2 = P_5 - \xi_2 \cdot V_2^2 + I_2 \cdot \frac{dV}{dt}$$

$P_2$  - давление в штоковой полости гидроцилиндра

$P_5$  - давление в сливном баке

$$m^* \frac{dV}{dt} = p_1 f_1 - \xi_1 f_1 V^2$$

$$m^* \frac{dV}{dt} = p_1 f_1 + m^* g - p_2 f_2 - R_H - R_{y1} - R_{y2}$$

$R_H$  - сила трения в направляющих

$R_{y1}$  и  $R_{y2}$  - сила трения в уплотнениях 1 и 2

$$m^* \frac{dV}{dt} = p_3 f_1 - \xi_1 f_1 V^2 - I_1 f_1 \frac{dV}{dt} + m^* g - p_5 f_2 - \xi_2 V^2 f_2 - I_2 f_2 \frac{dV}{dt} - R_H - R_{y1} - R_{y2}$$

$$R_H = 0,1m^* \times g ; R_{y1} = 0,03p_1 \times f_1 ; R_{y2} = 0,03p_2 \times f_2$$

$$(m^* + I_1 f_1 + I_2 f_2) \frac{dV}{dt} + (\xi_1 f_1 + \xi_2 f_2) V^2 - p_5 f_2 - p_3 f_1 + m^* g - 0,1 m^* g - 0,03 p_1 f_1 - 0,03 p_2 f_2 = 0$$

$$a \times \frac{dV}{dt} + b \times V^2 - c = 0 \quad \text{- уравнение Рикатти}$$

$a$  – приведенная масса гидромеханической системы,

$b$  – приведенный коэффициент гидравлического сопротивления,

$c$  – сумма активных сил и сил сопротивления.

$I_1 f_1$  - приведенная масса жидкости в напорной магистрали

$I_2 f_2$  - приведенная масса жидкости в сливной магистрали

### Решение уравнения Рикатти.

$$\frac{dV}{dt} = \frac{c}{a} - \frac{b}{a} \cdot V^2$$

$$dt = \frac{dV}{c/a - b/a V^2} = \frac{a}{b} \cdot \frac{dV}{\left(\left(\sqrt{\frac{c}{b}}\right)^2 - V^2\right)} \quad (1)$$

После интегрирования (1) получаем:

$$t = \frac{a}{b} \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\frac{c}{b}}} \cdot \ln \frac{\sqrt{c/b} + V}{\sqrt{c/b} - V} + Const$$

Начальные условия:  $C = 0, V = 0, \ln 1 = 0 \Rightarrow const = 0$

$$t = \frac{a}{b} \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\frac{c}{b}}} \cdot \ln \frac{\sqrt{c/b} + V}{\sqrt{c/b} - V}$$

$$t = \frac{a}{2 \cdot \sqrt{c \cdot b}} \cdot \ln \frac{\sqrt{c/b} + V}{\sqrt{c/b} - V}$$

$$t \cdot \frac{2 \cdot \sqrt{c \cdot b}}{a} = \ln \frac{\sqrt{c/b} + V}{\sqrt{c/b} - V}$$

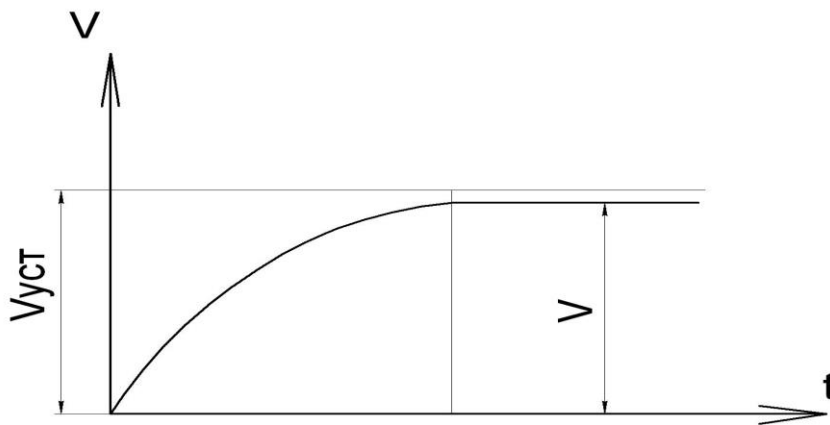


$$\frac{\sqrt{c/b} + V}{\sqrt{c/b} - V} = \exp\left(\frac{2 \cdot \sqrt{c \cdot b}}{a} \cdot t\right);$$

$$\sqrt{c/b} + V = \sqrt{c/b} \cdot \exp\left(\frac{2 \cdot \sqrt{c \cdot b}}{a} \cdot t\right) - V \cdot \exp\left(\frac{2 \cdot \sqrt{c \cdot b}}{a} \cdot t\right);$$

$$V = \sqrt{\frac{c}{b}} \frac{\exp 2 \frac{\sqrt{bc}}{a} t - 1}{\exp 2 \frac{\sqrt{bc}}{a} t + 1} = \sqrt{\frac{c}{b}} th \frac{\sqrt{bc}}{a} t$$

$$V = \sqrt{\frac{c}{b}} th \frac{\sqrt{bc}}{a} t$$



$$V_{уст} = \sqrt{\frac{c}{b}}$$

$$V = 0,95 \cdot V_{уст}$$

Разгон подвижных частей должен осуществляться до величины  $0,95 \cdot V_{уст}$ , а при скорости  $< 0,95 \cdot V_{уст}$  привод будет иметь завышенные габариты а следовательно и стоимость. При  $V > 0,95 \cdot V_{уст}$  завышены будут потери энергии при работе привода.

Определяем S:

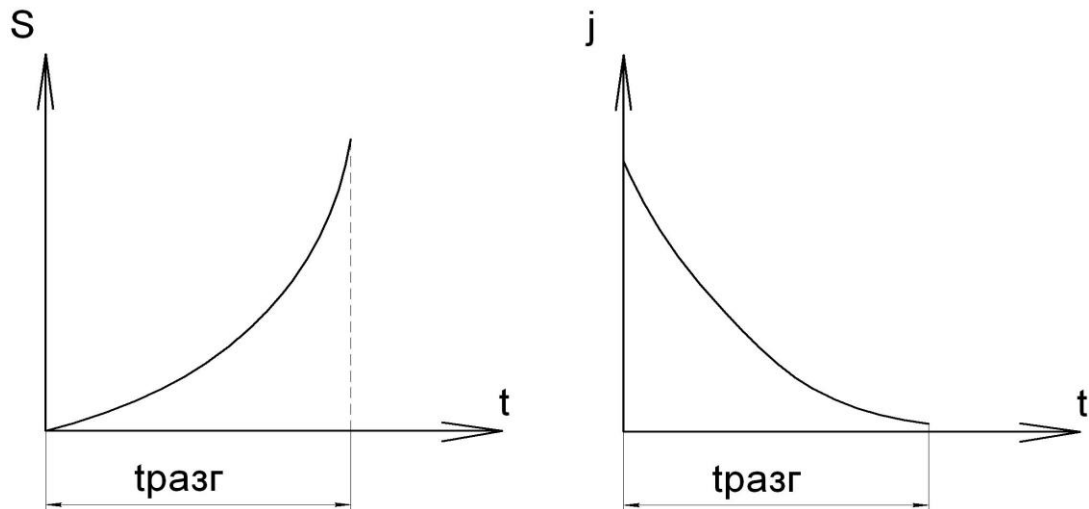
$$V = \frac{dS}{dt} = \sqrt{\frac{c}{b}} th \frac{\sqrt{bc}}{a} t$$

$$dS = \sqrt{\frac{c}{b}} th \frac{\sqrt{bc}}{a} t \cdot dt$$

$$S = \sqrt{\frac{c}{b}} \int th \frac{\sqrt{bc}}{a} t \cdot dt = \sqrt{\frac{c}{b}} \cdot \frac{a}{\sqrt{b \cdot c}} \int tg \frac{\sqrt{c \cdot b}}{a} t \cdot d\left(\frac{\sqrt{c \cdot b}}{a} t\right) = \frac{a}{b} \cdot \ln ch \frac{\sqrt{c \cdot b}}{a} t + C_1$$

Начальные условия:  $S = 0, t = 0$

$$S = \frac{a}{b} \cdot \ln ch \frac{\sqrt{c \cdot b}}{a} t$$



Ускорение подвижных частей:

$$j = \frac{c}{a} \left(1 - th^2 \frac{\sqrt{c \cdot b}}{a} t\right);$$

Скорость и ускорение, как функция от перемещения:

$$V = \sqrt{\frac{c}{b}} \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-2b}{a} S\right)\right) \quad j = \frac{c}{a} \cdot \exp\left(\frac{-2b}{a} S\right)$$

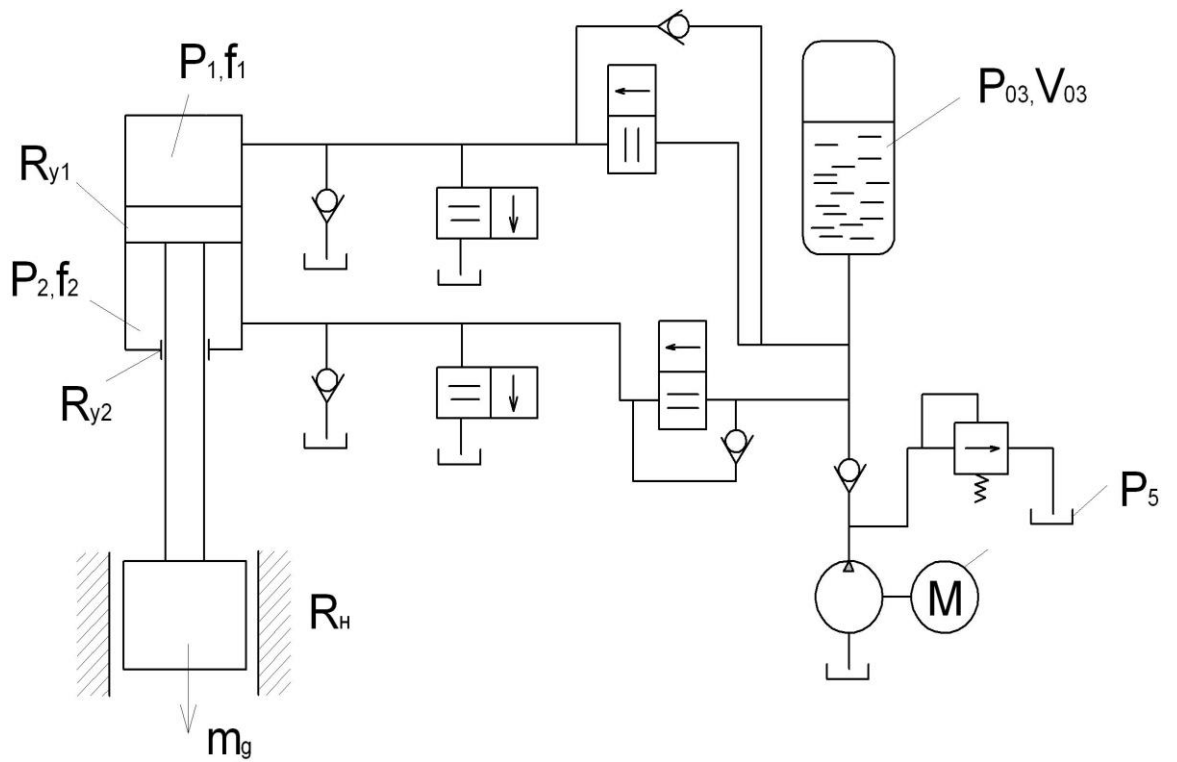
**“Анализ движения рабочих частей КШМ, сопряженных с гидравлическим звеном и с гидропневматическим аккумулятором с учетом переменного давления в аккумуляторе”**

$V_{03}$  – начальный объем газа в аккумуляторе

$\Delta V$  – маневровый объем

$V_3$  – текущее значение объема газа в аккумуляторе

$V_{03} < 15 \Delta V$

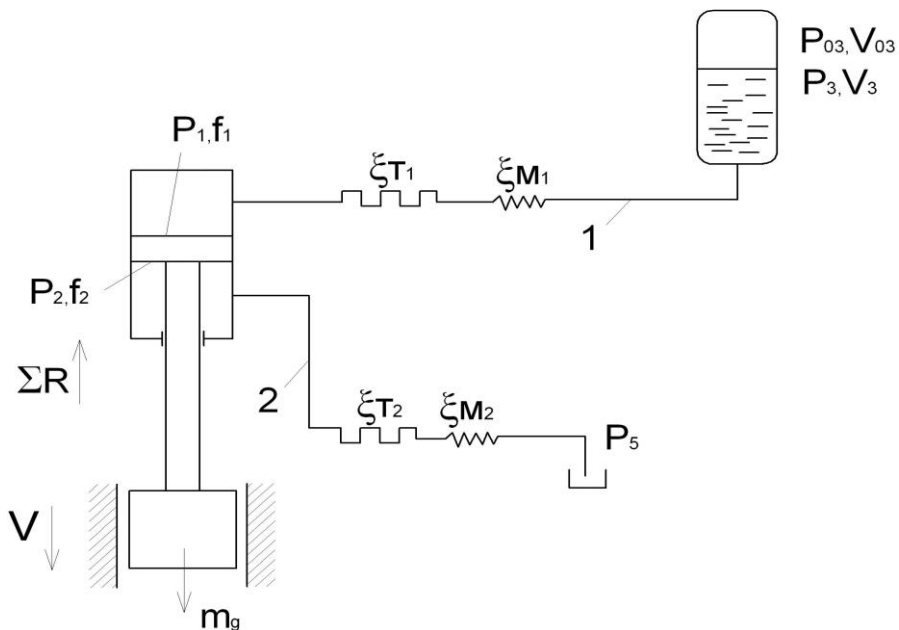


$$m \frac{dV}{dt} = p_1 f_1 - p_2 f_2 + m \times g - \sum R$$

$$P_1 = P_3 - \xi_1 \cdot V^2 - I_1 \cdot \frac{dV}{dt}$$

$$P_2 = P_5 + \xi_2 \cdot V^2 + I_2 \cdot \frac{dV}{dt}$$

Расчетная схема:



$$P_3 \times V_3^n = P_{03} \times V_{03}^n$$

$$P_3 = P_{03} \left( \frac{V_{03}}{V_3} \right)^n$$

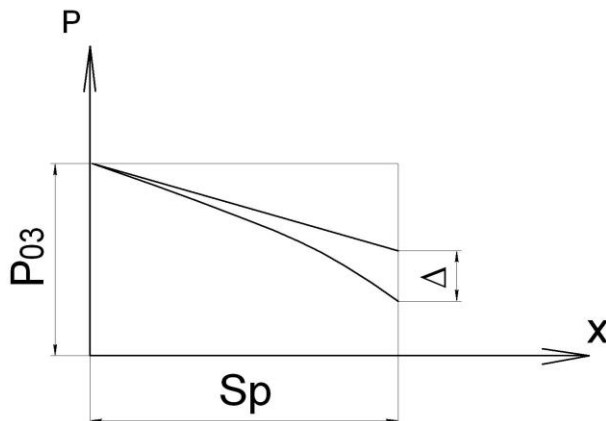
$n = 1,5$  – для гидромолотов

$$V_3 = V_{03} + \Delta V = V_{03} + f_1 \times x$$

$$P_3 = P_{03} \left( \frac{V_{03}}{V_{03} + f_1 \times x} \right)^n = P_{03} \times \left( 1 + \frac{f_1}{V_{03}} \times x \right)^{-n}$$

$$\left( 1 + \frac{f_1}{V_{03}} \times x \right)^{-n} = 1 - n \frac{f_1}{1 \times V_{03}} \times x + n^2 \frac{f_1}{2 \times V_{03}} \times x^2 \dots$$

$$P_3 = P_{03} \times \left( 1 - n \times \frac{f_1}{V_{03}} \times x \right)$$



$\Delta$  – погрешность (3-5%)

$$m \frac{dV}{dt} = P_{03} \times f_1 - P_{03} n \times \frac{f_1^2}{V_{03}} \times x - \xi_1 f_1 V^2 - I_1 f_1 \frac{dV}{dt} + m \times g -$$

$$p_5 f_2 - \xi_2 V^2 f_2 - I_2 f_2 \frac{dV}{dt} - \sum R$$

$$(m + I_1 f_1 + I_2 f_2) \frac{dV}{dt} + (\xi_1 f_1 + \xi_2 f_2) V^2 + P_{03} n \times \frac{f_1^2}{V_{03}} \times x - (P_{03} \times f_1 +$$

$$m \times g - \sum R) = 0$$

$$(m + I_1 f_1 + I_2 f_2) = a$$

$$(\xi_1 f_1 + \xi_2 f_2) = b$$

$$(P_{03} \times f_1 + m \times g - \sum R) = c$$

$$P_{03} n \times \frac{f_1^2}{V_{03}} \times x = \kappa$$

$$a \times \frac{dV}{dt} + b \times V^2 + \kappa \times x - c = 0$$

a – приведенная масса гидромеханической системы,

b – коэффициент, учитывающий потери давления в напорной и сливной магистральных

c – коэффициент, учитывающий активные силы и силы сопротивления.

κ - изменение давления в гидропневматическом аккумуляторе

$$\frac{dV}{dt} = \frac{c}{a} - \frac{\kappa}{a} \times x - \frac{b}{a} \cdot V^2$$

Величина b крайне мала по сравнению с a и c. Допустим: b=0

$$\frac{dV}{dt} = \frac{c}{a} - \frac{\kappa}{a} \times x$$

$$V dV = \frac{c}{a} dx - \frac{\kappa}{a} x dx$$

$$\frac{V^2}{2} = \frac{c}{a} x - \frac{\kappa}{a} \times \frac{x^2}{2} + C$$

C = 0 из начальных условий.

$$V = \sqrt{\frac{2c}{a} x - \frac{\kappa}{a} \times x^2}$$

$$\frac{dx}{dt} = V = \sqrt{\frac{2c}{a} x - \frac{\kappa}{a} \times x^2}$$

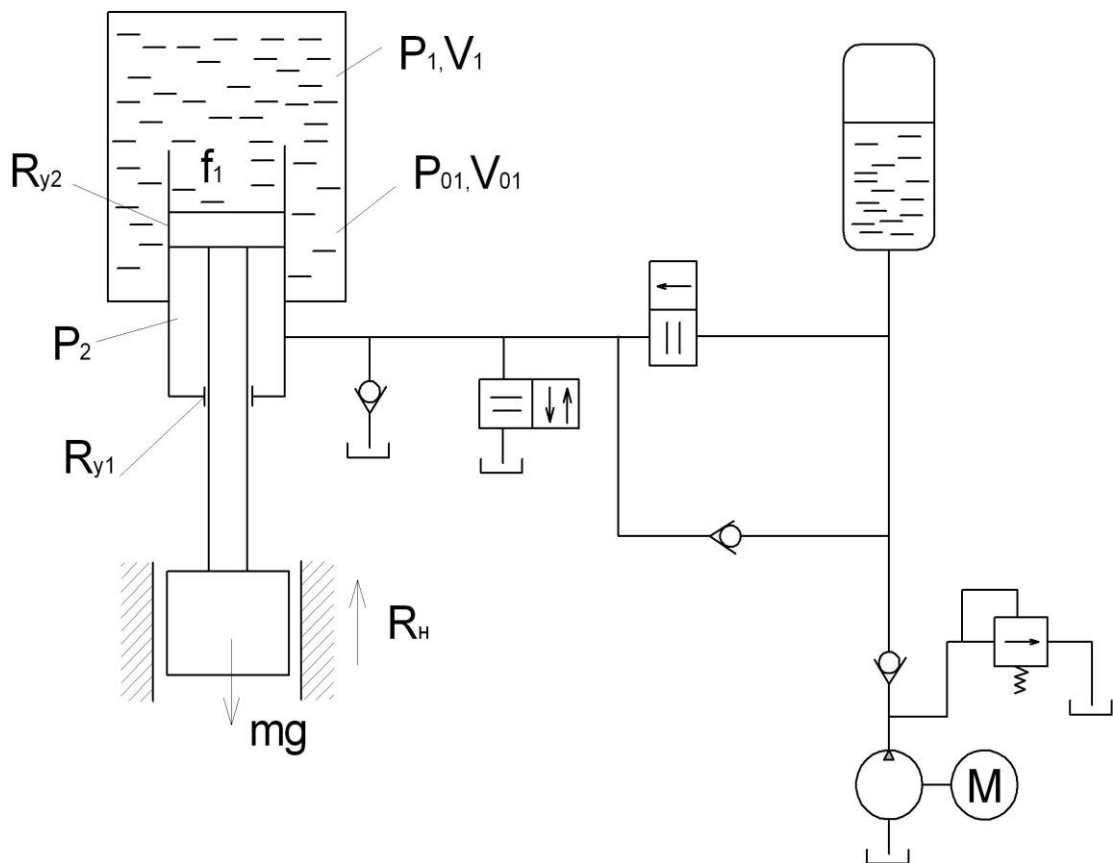
$$t = \int \frac{dx}{\sqrt{\frac{2c}{a}x - \frac{\kappa}{a}x^2}}$$

$$t = \sqrt{\frac{k}{a}} \times \left( \arcsin\left(\frac{k}{a}x - 1\right) + \frac{\pi}{2} \right)$$

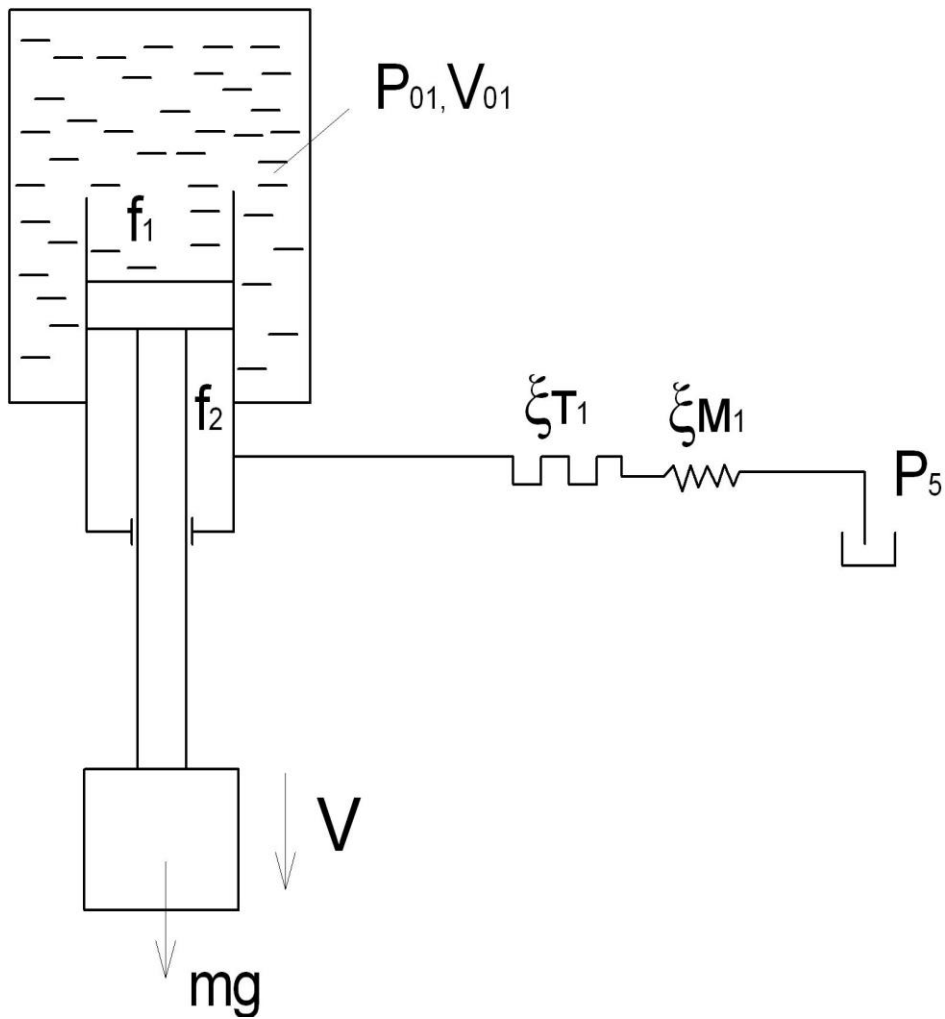
$$x = \frac{c}{k} \left( 1 - \cos \sqrt{\frac{k}{a}} \times t \right)$$

$$j = \frac{c}{a} \cos\left(\frac{k}{a}t\right) \quad V = \frac{c}{\sqrt{ak}} \times \sin\left(\sqrt{\frac{k}{a}}t\right)$$

**“Анализ движения подвижных частей КШМ, сопряженных с гидравлическим звеном и с воздушным ресивером с учетом переменного давления в ресивере.”**



Расчетная схема:



$$m \frac{dV}{dt} = p_1 f_1 - p_2 f_2 + m \times g - \sum R$$

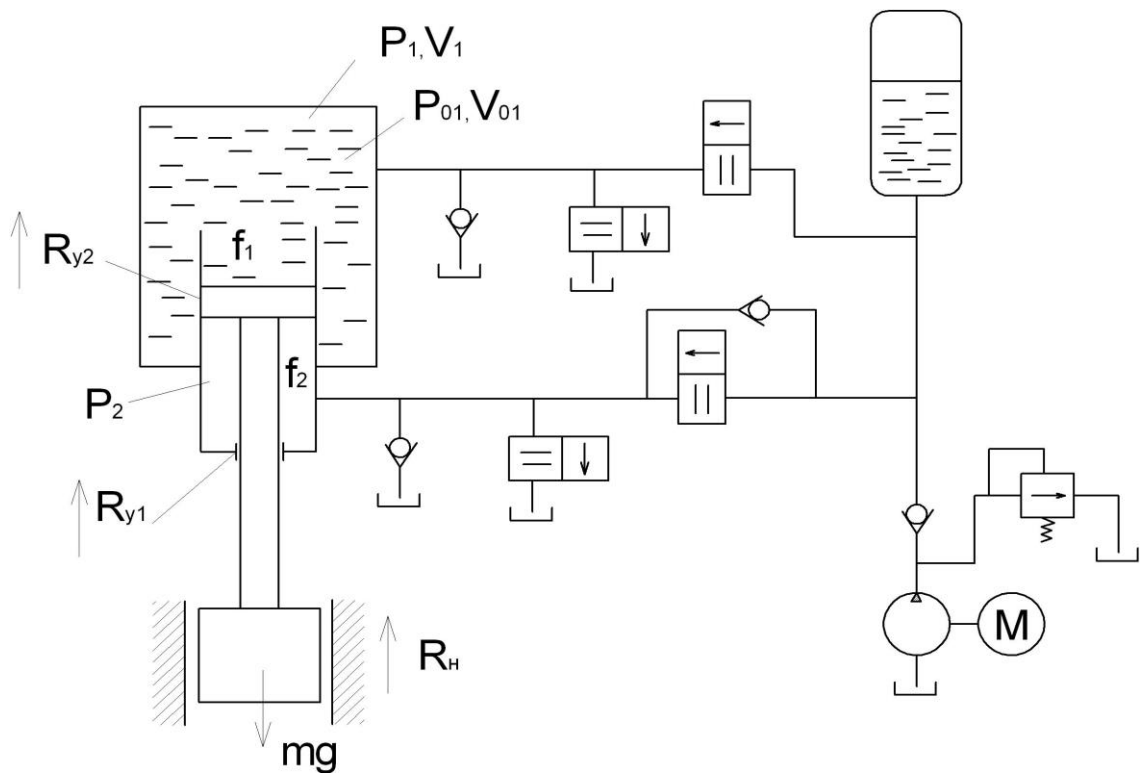
$$P_2 = P_5 + \xi_2 \cdot V^2 + I_2 \cdot \frac{dV}{dt}$$

$$P_1 = P_{01} \times \left(1 - n \times \frac{f_1}{V_{01}} \times x\right)$$

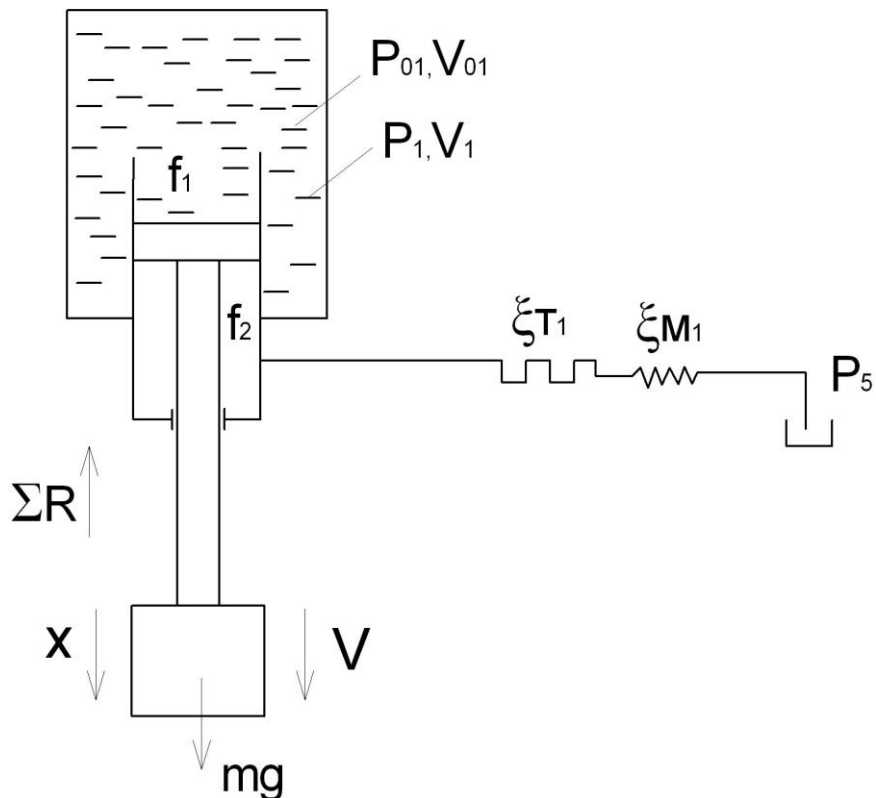
$$m \frac{dV}{dt} = P_{01} \times f_1 - P_{01} \times n \times \frac{f_1^2}{V_{01}} \times x + m \times g - p_5 f_2 - \xi_2 f_2 V^2 -$$

$$- I_2 f_2 \frac{dV}{dt} - \sum R$$

**“Анализ движения рабочих частей КШМ, сопряженных с гидравлическим звеном и гидравлическим аккумулятором с учетом переменного давления в аккумуляторе.”**



Расчетная схема:





$$m \frac{dV}{dt} = p_1 f_1 - p_2 f_2 + m \times g - \sum R$$

$$P_2 = P_5 + \xi_2 \cdot V^2 + I_2 \cdot \frac{dV}{dt}$$

$$P_1 = P_{01} - \chi^* \times \frac{\Delta V}{V}$$

$$\chi^* = \frac{\chi}{\left(1 + \frac{d}{\delta} \times \frac{\chi}{E}\right)}$$

$\chi$  – модуль объемной упругости жидкости

$d$  – диаметр цилиндра

$\delta$  – толщина стенок цилиндра

$E$  – модуль Юнга материала цилиндра

$$m \frac{dV}{dt} = P_{01} \times f_1 - \chi^* \times \frac{f_1^2}{V_{01}} \times x + m \times g - p_5 f_2 - \xi_2 f_2 V^2 -$$

$$- I_2 f_2 \frac{dV}{dt} - \sum R$$