

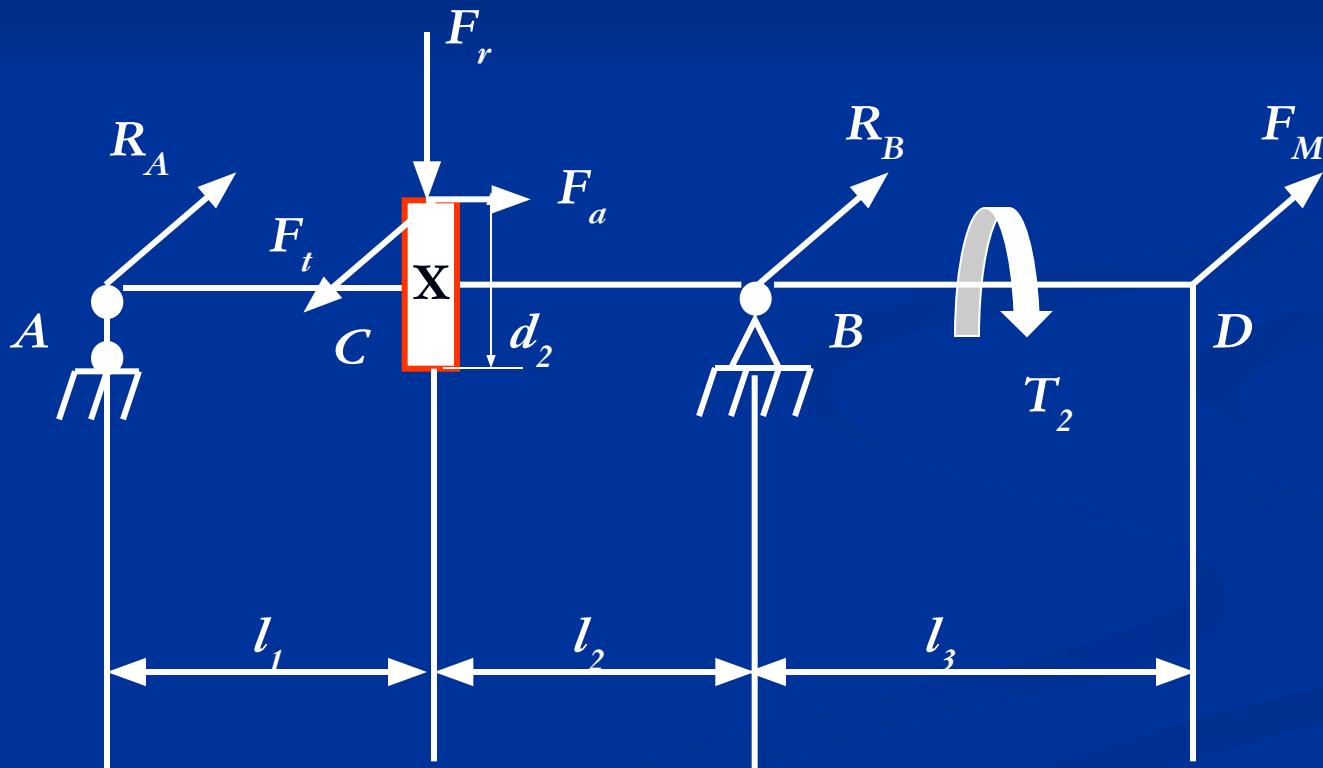
**Домашнее задание по  
курсу «Детали машин» №4**

**«Проверочный расчет  
тихоходного вала  
редуктора»**

# 1. Расчет силовых нагрузок на вал и построение эпюр изгибающих моментов и крутящего момента:

## 1.1. Расчет силовых нагрузок:

### 1.1.1. Расчетная схема вала редуктора:



### 1.1.2. Тангенциальная сила, н:

$$F_t = \frac{2 \cdot T_2}{d_2} = \frac{2 \cdot 1000 \cdot T_2}{d_2}$$

### 1.1.3. Радиальная сила, н:

$$F_r = \frac{F_t \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\cos \beta}$$

$\alpha = 20^\circ$  - угол зацепления;  $\operatorname{tg} \alpha = 0,364$

$\beta$  угол наклона зубьев.

$\cos \beta = \cos 0 = 1$  для прямозубой передачи.

#### *1.1.4. Осевая сила, н:*

$$F_a = F_t \cdot \operatorname{tg} \beta$$

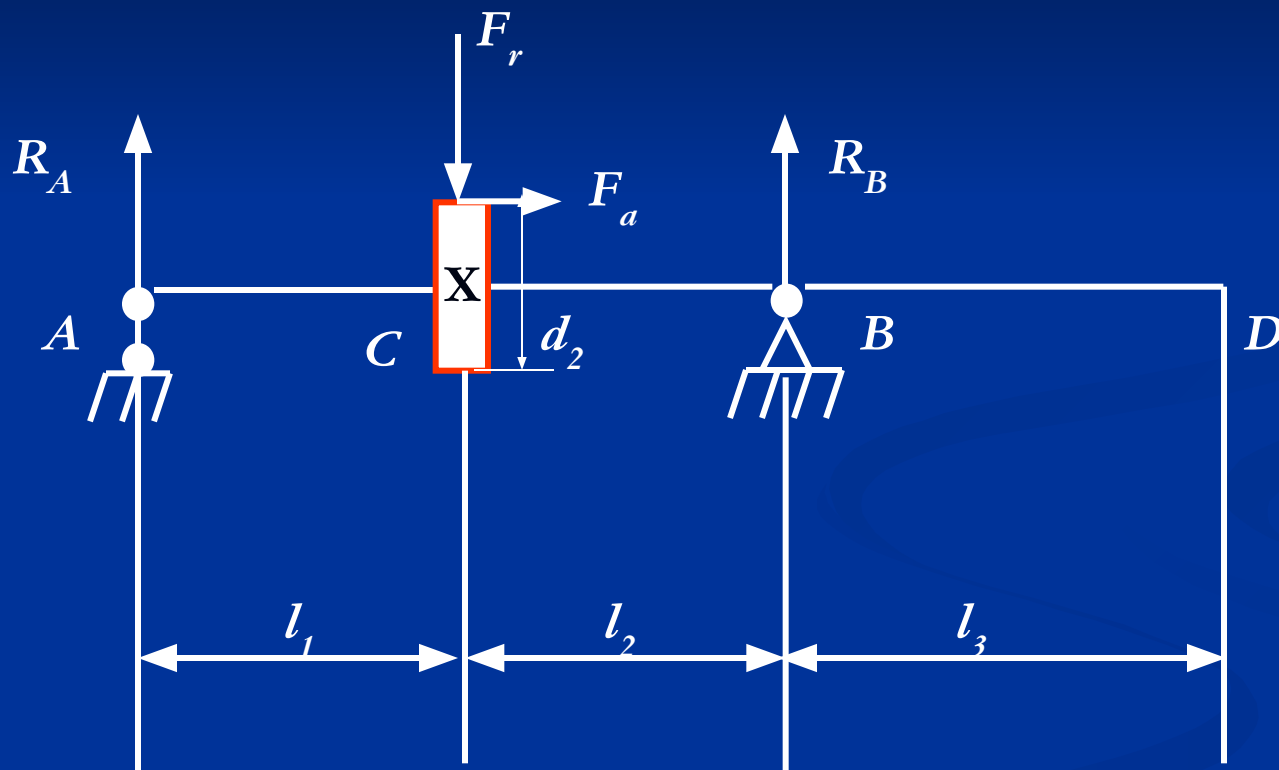
*$\operatorname{tg} \beta = \operatorname{tg} \theta = 0$ , поэтому при прямозубом зацеплении осевая сила отсутствует.*

#### *1.1.5. Сила реакции в муфте, н:*

$$F_m = 0,3 \cdot F_t$$

## 1.2. Построение эюр изгибающих моментов и крутящего момента:

### 1.2.1. Построение эюр изгибающих моментов в вертикальной плоскости:



*Определение опорных реакций от радиальной  $F_r$  и осевой  $F_a$  сил:*

$$\sum M_B = 0;$$

$$R_{ay} \cdot (l_1 + l_2) - F_r \cdot l_2 + F_a \cdot \frac{d_2}{2} = 0;$$

$$R_{ay} = \frac{F_r \cdot l_2 - F_a \cdot \frac{d_2}{2}}{(l_1 + l_2)}, \text{ н};$$

$$\sum M_A = 0;$$

$$R_{by} \cdot (l_1 + l_2) - F_r \cdot l_1 - F_a \cdot \frac{d_2}{2} = 0;$$

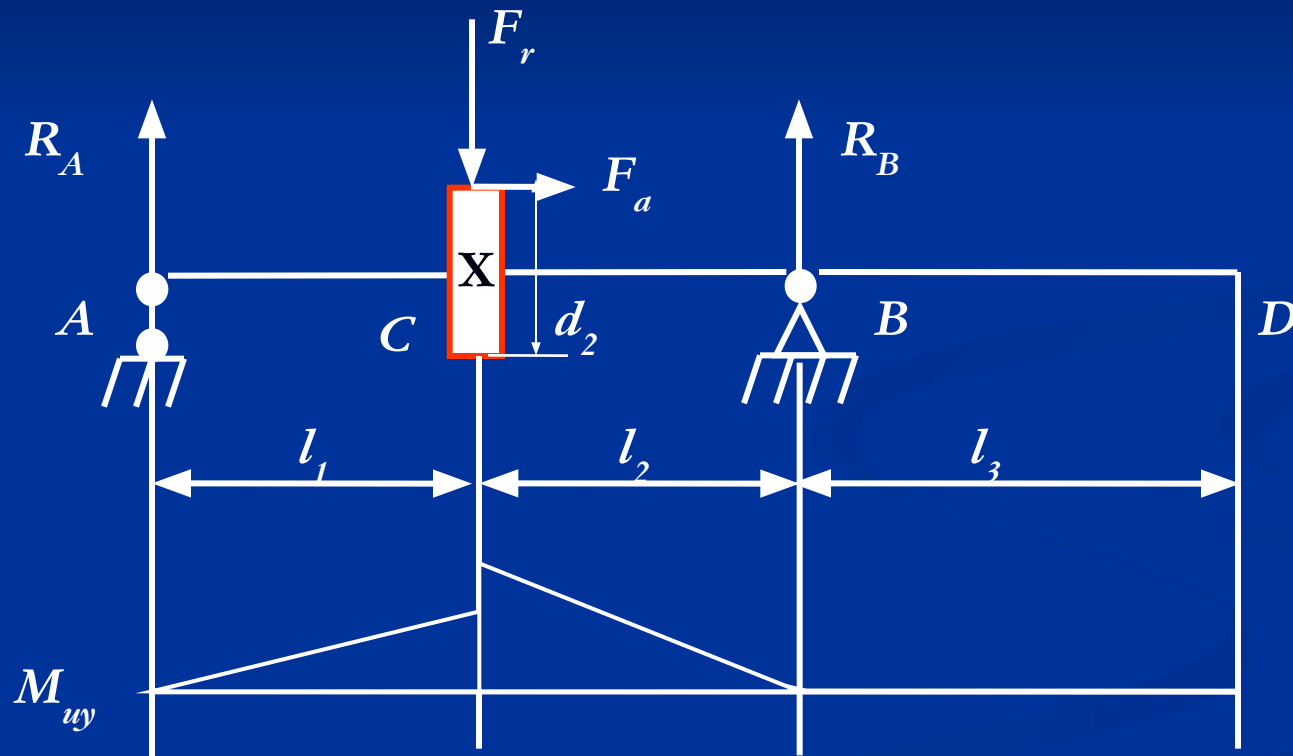
$$R_{by} = \frac{F_r \cdot l_1 + F_a \cdot \frac{d_2}{2}}{(l_1 + l_2)}, \text{ н}.$$

*Проверяем правильность определения реакций:*

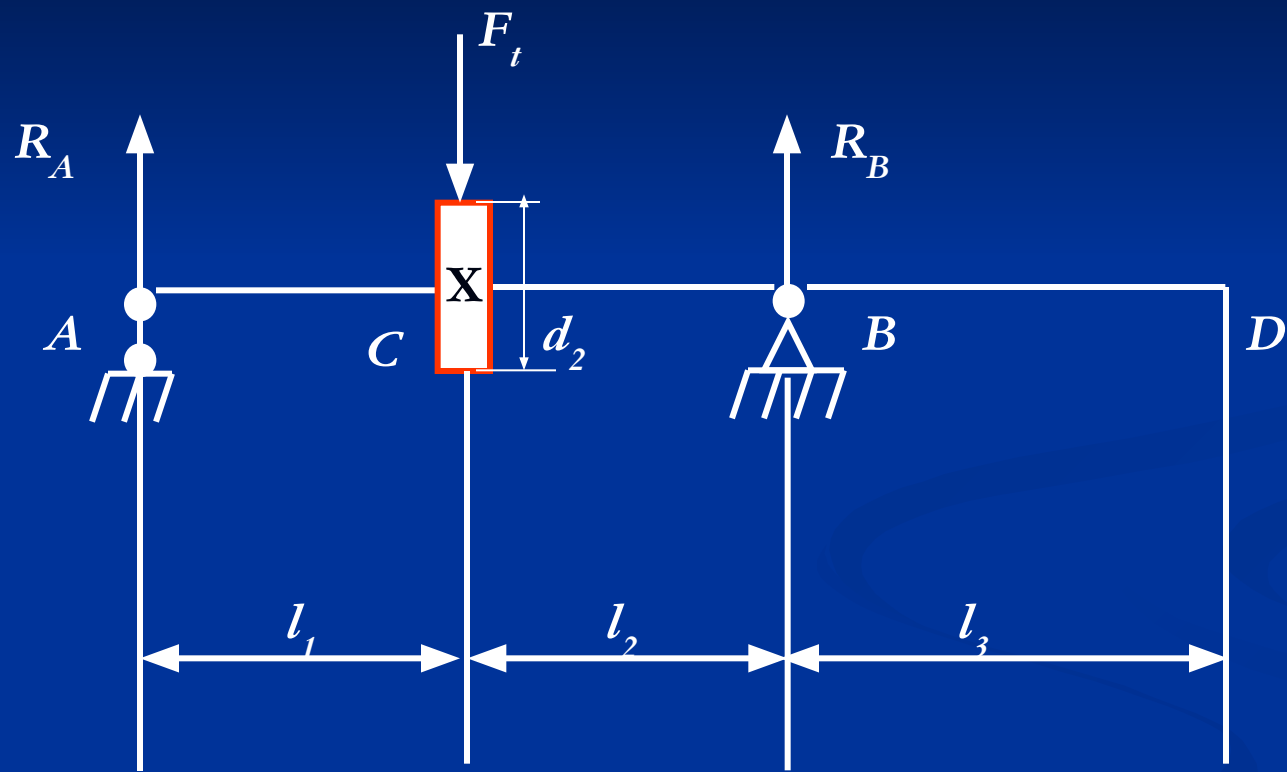
$$\sum R_y = 0; R_{ay} - F_r + R_{by} = 0$$

Если реакции найдены правильно, строим этуру изгибающих моментов от сил радиальной и осевой:

$$M_{uy} = R_{ay} \cdot l_1, \text{ н} \cdot \text{м}$$



1.2.2. Построение эпюр изгибающих моментов в горизонтальной плоскости:





*Определение опорных реакций от тангенциальной силы  $F_t$ :*

$$\sum M_B = 0;$$

$$R_{ax} \cdot (l_1 + l_2) - F_t \cdot l_2 = 0;$$

$$R_{ax} = \frac{F_t \cdot l_2}{(l_1 + l_2)}, \text{ н};$$

$$\sum M_A = 0;$$

$$R_{bx} \cdot (l_1 + l_2) - F_t \cdot l_1 = 0;$$

$$R_{bx} = \frac{F_t \cdot l_1}{(l_1 + l_2)}, \text{ н};$$

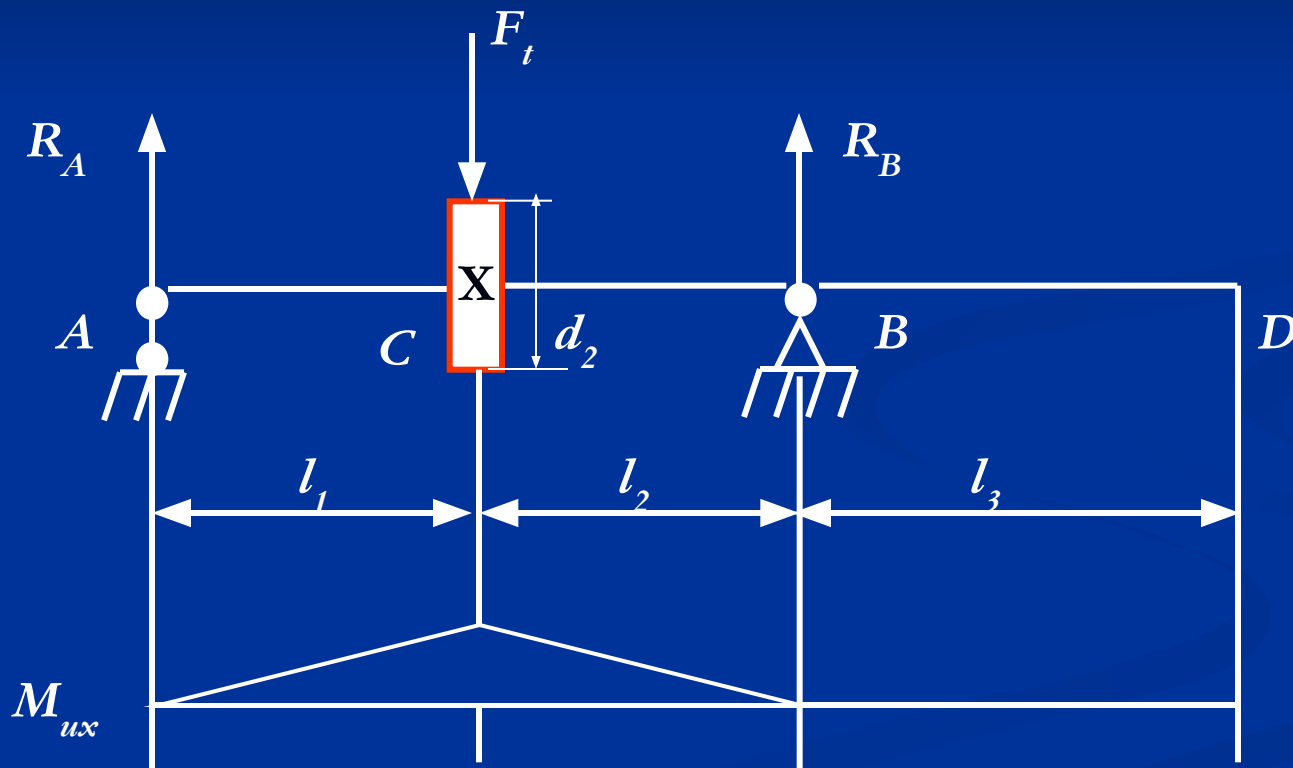
$$R_{ax} = R_{bx}$$

*Проверяем правильность определения реакций:*

$$\sum R_x = 0; R_{ax} - F_t + R_{bx} = 0$$

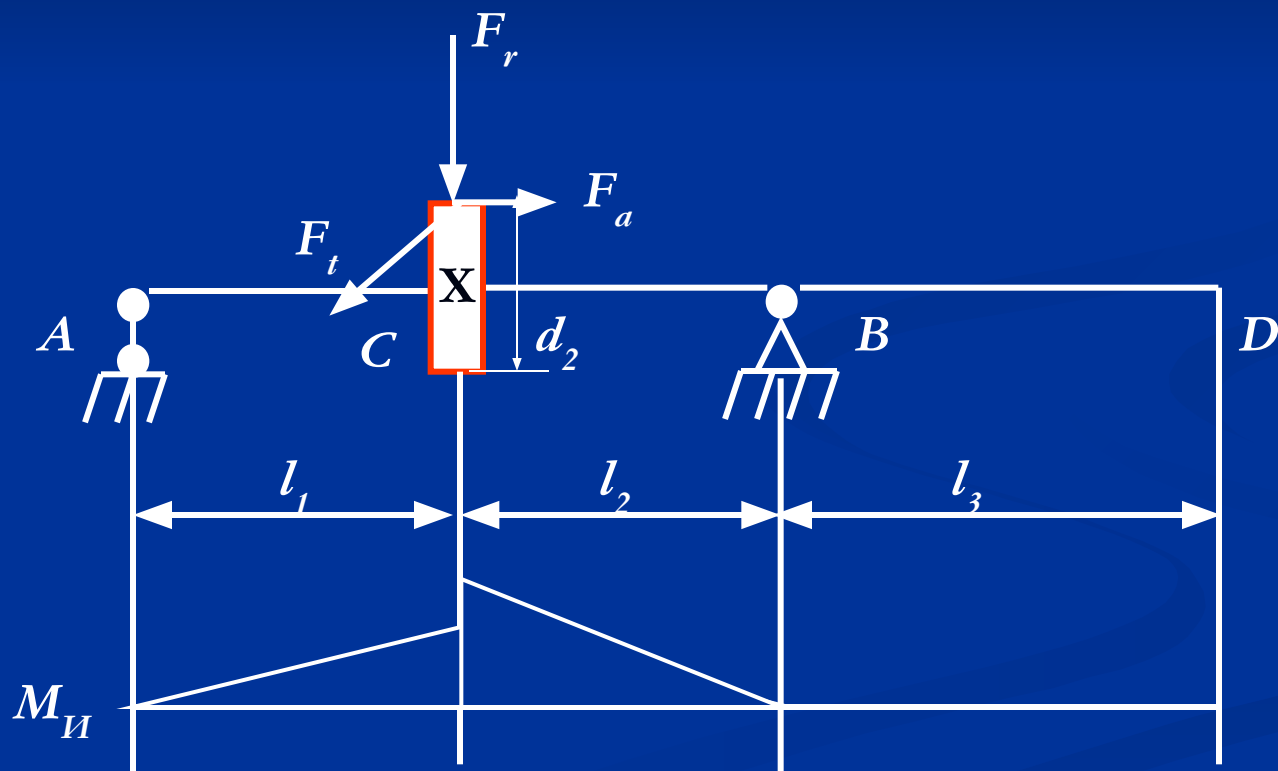
Если реакции найдены правильно, строим эпюру изгибающих моментов от тангенциальной силы:

$$M_{ix} = R_{ax} \cdot l_1, \text{ н} \cdot \text{м}$$



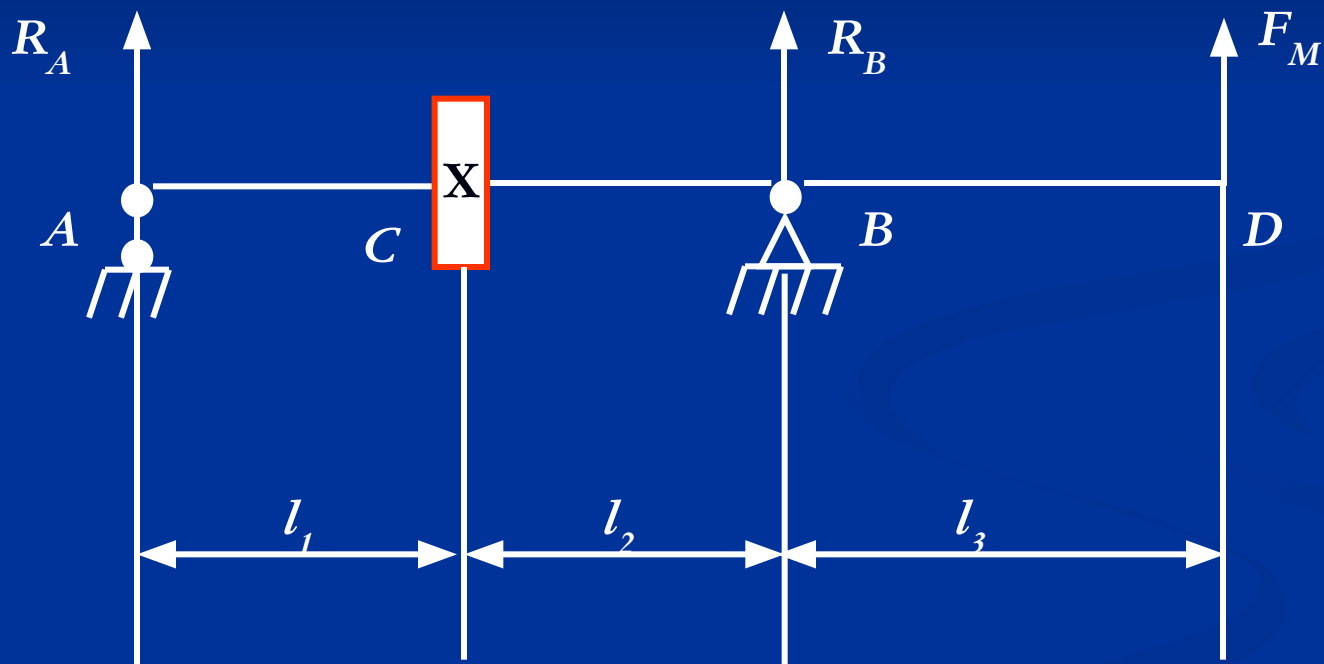
1.2.3. Построение суммарной эпюры изгибающего момента от действия тангенциальной, радиальной и осевой сил:

$$M_{И} = \sqrt{M_{ux}^2 + M_{uy}^2}, \text{ Н} \cdot \text{м}$$



### 1.2.4. Построение эпюры изгибающих моментов от действия силы $F_M$ :

На консольном участке вала находится полумуфта, которая нагружает вал дополнительно поперечной силой.



*Определение опорных реакций от действия силы  $F_M$ :*

$$\sum M_A = 0;$$

$$R_{bM} \cdot (l_1 + l_2) + F_M \cdot (l_1 + l_2 + l_3) = 0;$$

$$R_{bM} = -\frac{F_M \cdot (l_1 + l_2 + l_3)}{(l_1 + l_2)}, \text{ н};$$

*Меняем направление реакции в точке В*

$$\sum M_B = 0;$$

$$-R_{aM} \cdot (l_1 + l_2) + F_M \cdot l_3 = 0;$$

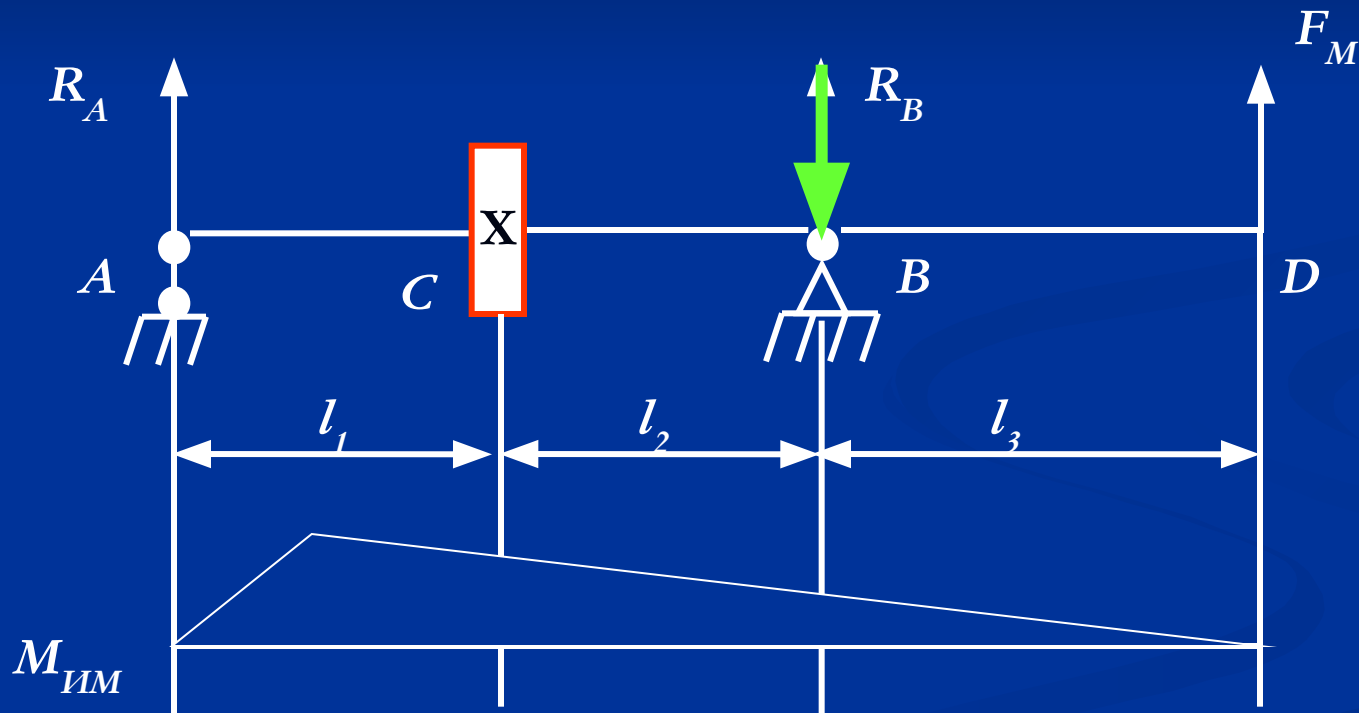
$$R_{aM} = \frac{F_M \cdot l_3}{(l_1 + l_2)}, \text{ н};$$

*Проверяем правильность определения реакций:*

$$\sum R_M = 0, R_{aM} - R_{bM} + F_M = 0$$

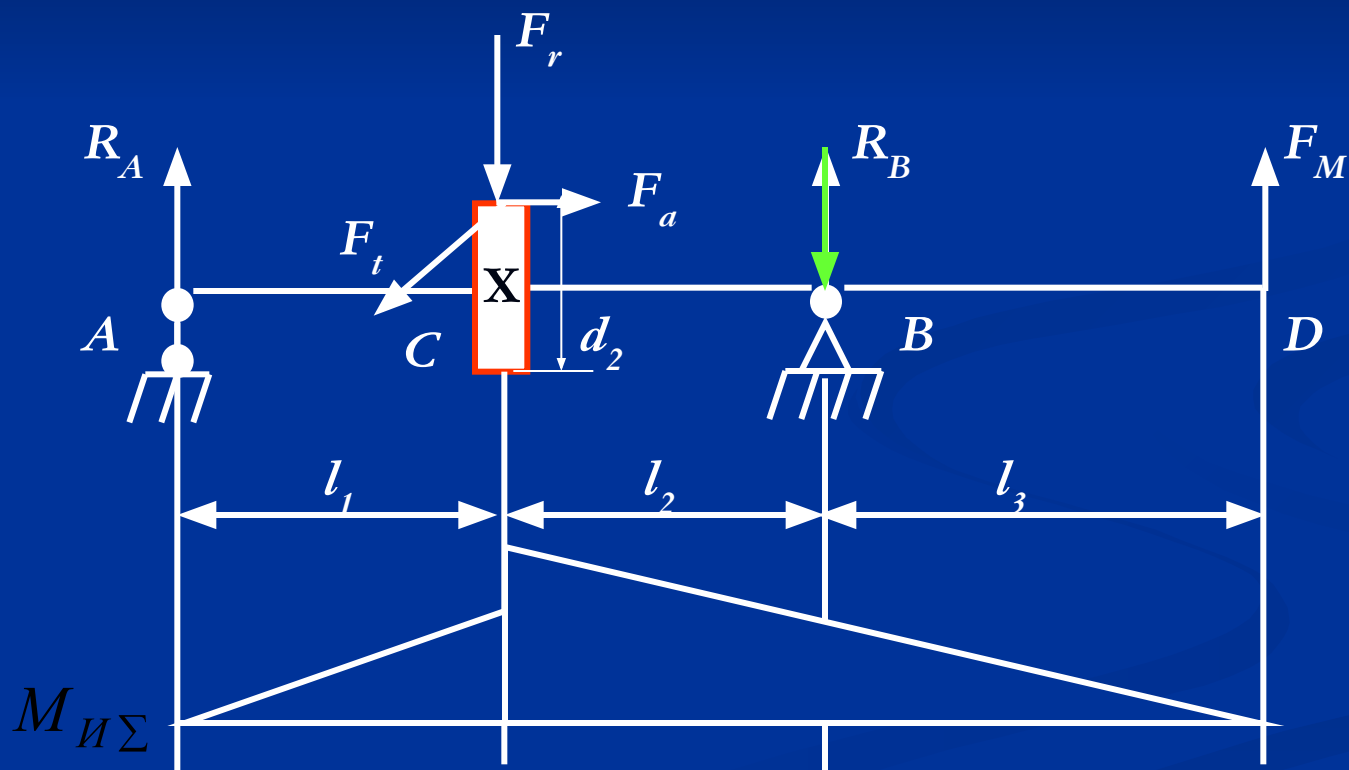
Если реакции найдены правильно, строим эпюру изгибающих моментов от действия силы реакции в муфте:

$$M_{ИМ} = R_{aM} \cdot (l_1 + l_2), \text{ н} \cdot \text{м}$$

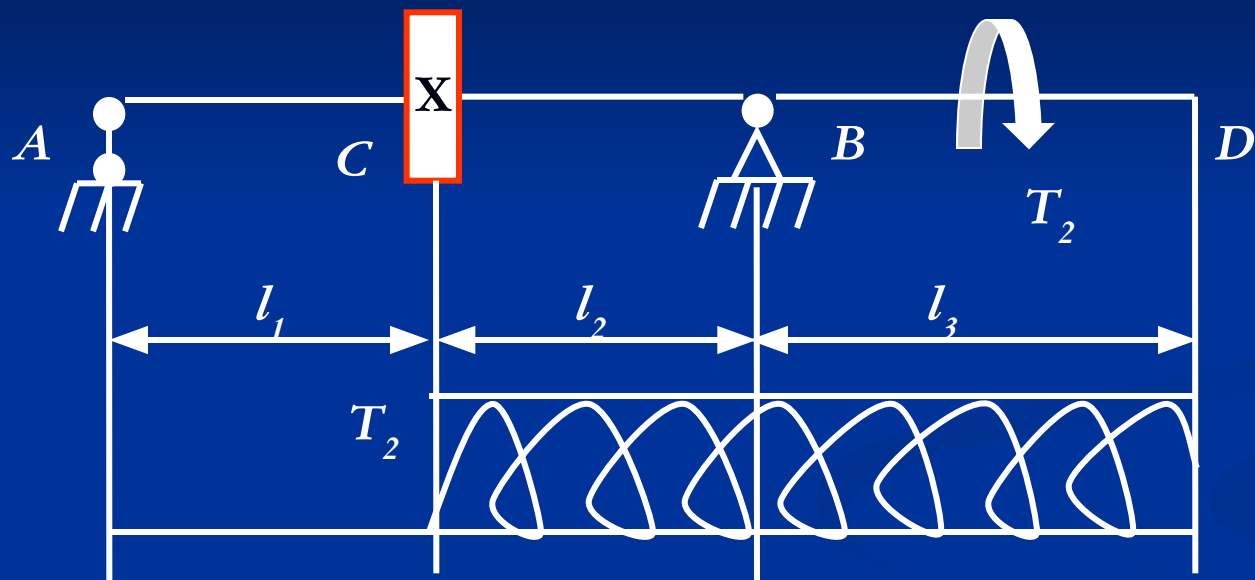


1.2.5. Построение суммарной эпюры изгибающих моментов от действия всех сил:

$$M_{И\Sigma} = M_{И} + M_{ИМ}, \text{ н} \cdot \text{м}$$

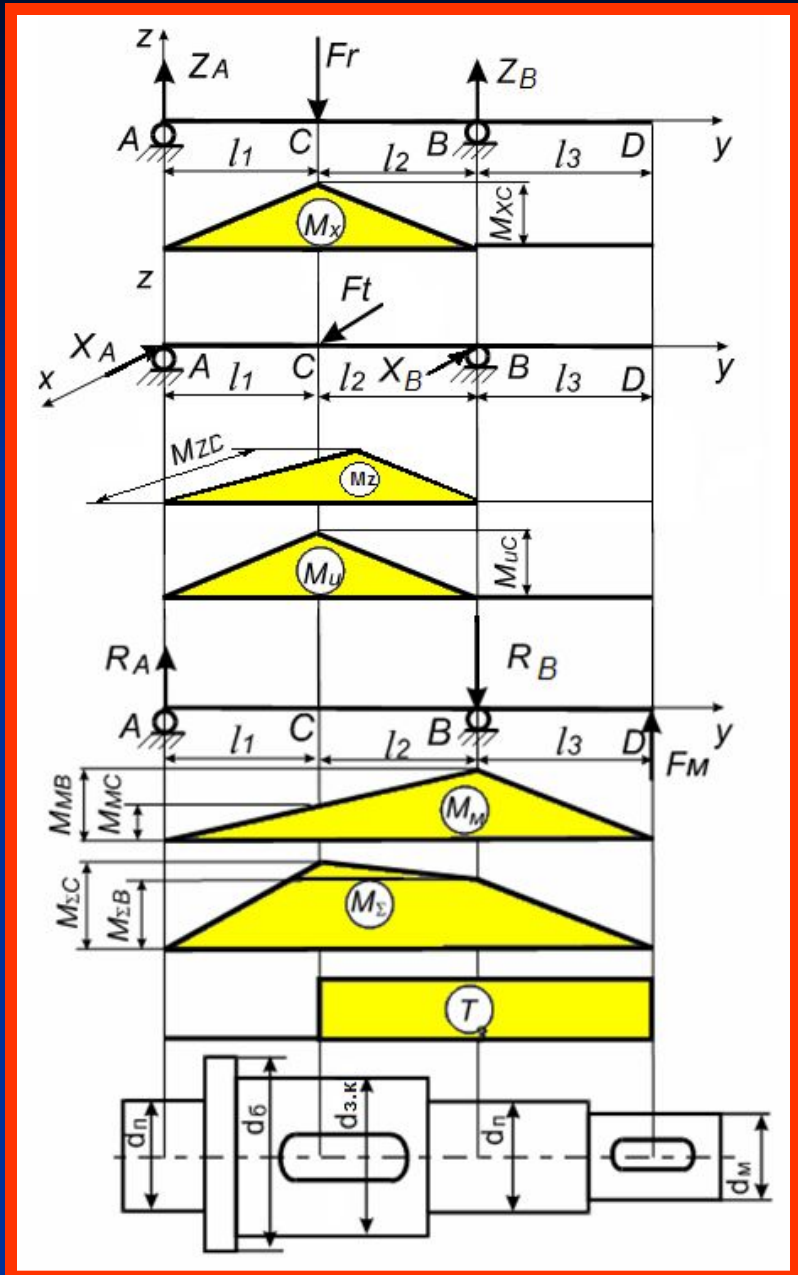


### 1.2.6. Построение эпюры крутящего момента:





# Сводная эюра изгибающих и крутящих моментов



## 2. Уточненный расчет тихоходного вала редуктора

Уточненный расчет выполняют, как проверочный для определения расчетного коэффициента запаса прочности:

$$S_{\Pi} = \frac{S_{\sigma} \cdot S_{\tau}}{\sqrt{S_{\sigma}^2 + S_{\tau}^2}}$$

Коэффициент запаса прочности по нормальным напряжениям:

$$S_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{\frac{k_{\sigma} \cdot \sigma_a}{\varepsilon_{\sigma} \cdot \beta} + \psi_{\sigma} \cdot \sigma_{ср.}}$$

Коэффициент запаса прочности по касательным напряжениям:

$$S_{\tau} = \frac{\tau_{-1}}{\frac{k_{\tau} \cdot \tau_a}{\varepsilon_{\tau} \cdot \beta} + \psi_{\tau} \cdot \tau_{ср.}}$$

*Пределы выносливости материала вала при симметричных циклах изгиба и кручения, если нет табличных данных, тогда для углеродистых сталей:*

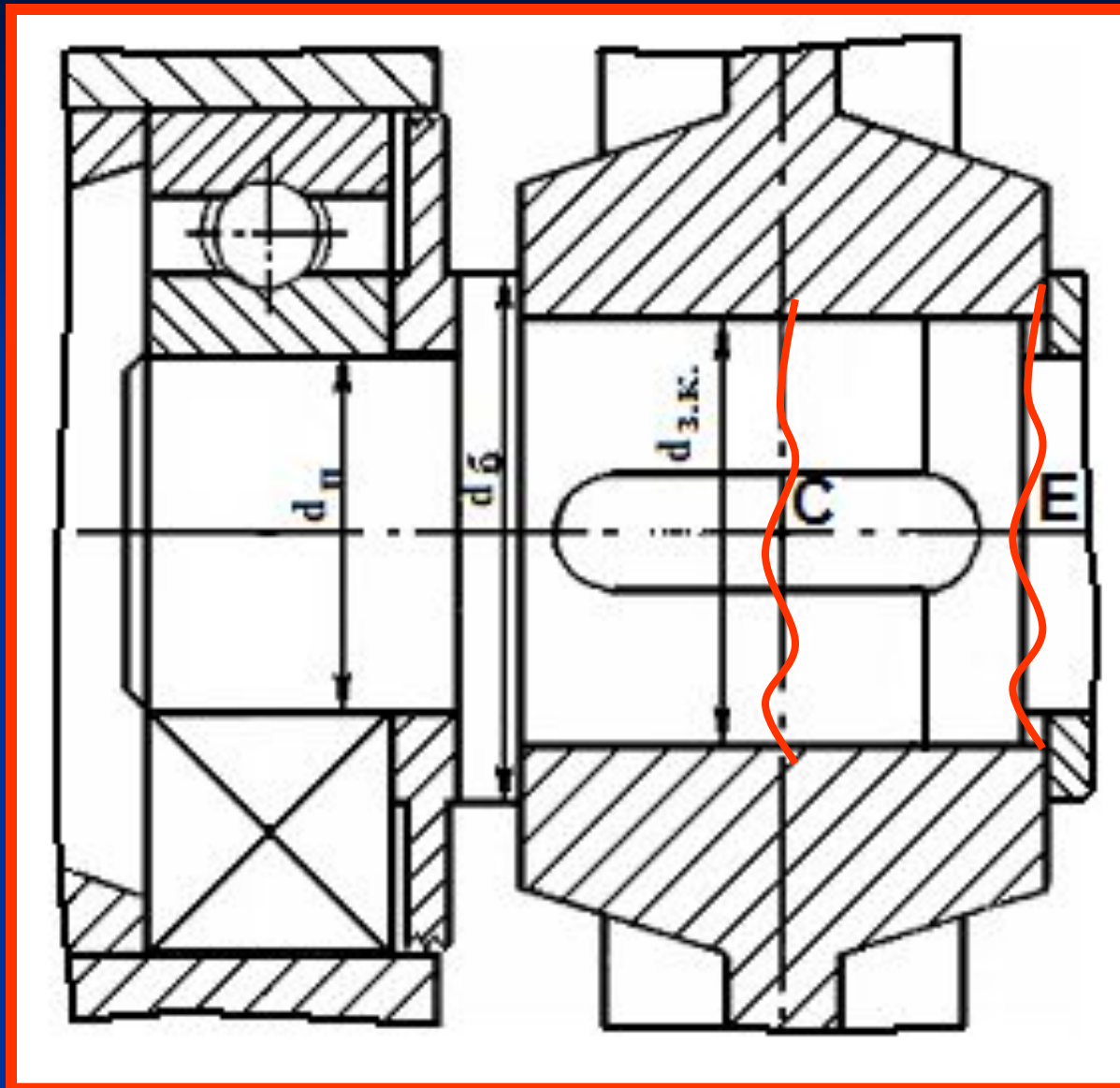
$$\sigma_{-1} \approx 0,43 \cdot \sigma_B, \text{ МПа}$$

$$\tau_{-1} \approx 0,58 \cdot \sigma_{-1}, \text{ МПа}$$

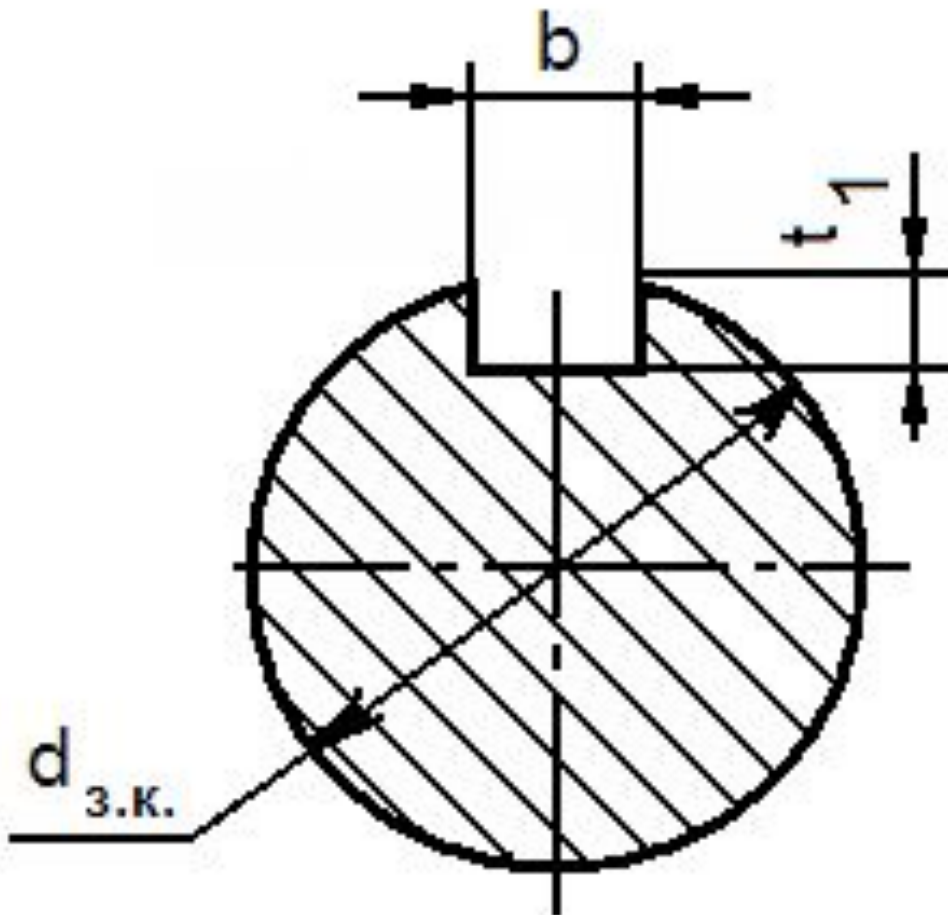
*Расчетный коэффициент запаса прочности определяют в опасном сечении. Опасным считается сечение вала, для которого коэффициент запаса прочности имеет наименьшее значение, оно может не совпадать с сечением, где возникают наибольший изгибающий и крутящий моменты, поэтому следует проверять все опасные сечения.*

$$[S_{\Pi}] \geq 1,5 \div 4$$

*Опасные сечения в точках С и Е*



## 2.1. Проверка прочности сечения в точке С:



Дано:

$$d_{3.к.} = \dots$$

$$M_{uC} = \dots$$

$$T_2 = \dots$$

$$b = \dots$$

$$t_1 = \dots$$

$$\sigma_B = 520 \text{ МПа},$$

$$\sigma_m = 280 \text{ МПа},$$

$$\tau_T = 170 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{-1} = 250 \text{ МПа},$$

$$\tau_{-1} = 150 \text{ МПа}$$

*Напряжения изгиба изменяются по симметричному циклу, напряжения кручения – по отнулевому (пульсирующему) циклу:*

$$\sigma_a = \sigma_{И} = \frac{M_{И}}{W_{И.НЕТТО}}, \text{МПа};$$

$$\sigma_{ср.} = 0$$

$$\tau_a = \tau_{ср.} = \frac{\tau_K}{2} = \frac{T_2}{2 \cdot W_{К.НЕТТО}}, \text{МПа.}$$

2.1.1. Моменты сопротивления валов при изгибе  $W_{и.нетто}$  и кручении  $W_{к.нетто}$  в сечении ослабленном шпоночным пазом определяются:

$$W_{и.нетто} = \frac{\pi \cdot d_{з.к}^3}{32} - \frac{b \cdot t_1 \cdot (d_{з.к} - t_1)^2}{2 \cdot d_{з.к}}, \text{ мм}^3$$

$$W_{к.нетто} = \frac{\pi \cdot d_{з.к}^3}{16} - \frac{b \cdot t_1 \cdot (d_{з.к} - t_1)^2}{2 \cdot d_{з.к}}, \text{ мм}^3$$

*2.1.2. Коэффициенты концентрации напряжений при изгибе  $K_\sigma$  и кручении  $K_\tau$  вала, ослабленного шпоночным пазом определяются:*

Коэффициент	Предел прочности $\sigma_B$ , МПа			
	600	700	800	900
$K_\sigma$	1,60	1,75	1,80	1,90
$K_\tau$	1,50	1,60	1,70	1,90



*2.1.3. Масштабные факторы при изгибе  $\varepsilon_\sigma$  и кручении  $\varepsilon_\tau$  для углеродистых сталей определяются из таблицы, в соответствии с пределом прочности и диаметром вала в данном сечении.*

Сталь	$\sigma_B$ , МПа	$\varepsilon_\sigma \sim \varepsilon_\tau$ при d, мм							
		10	20	30	40	50	70	100	200
Углеродистая	400 – 500	0,98	0,92	0,88	0,85	0,82	0,76	0,70	0,63
Углеродистая и легированная	500 – 800	0,97	0,89	0,85	0,81	0,78	0,73	0,68	0,61
Легированная	800 – 1200	0,95	0,86	0,81	0,77	0,77	0,74	0,65	0,59
Легированная	1200 – 1400	0,94	0,83	0,77	0,73	0,70	0,66	0,62	0,57

*2.1.4. Коэффициент  $\beta$ , зависящий от степени шероховатости поверхности (способ обработки) определяется по таблице, для качественных поверхностей способ обработки шлифование:*

Способ обработки	Значения $\beta$ при $\sigma_B$ , МПа		
	400 – 500	600 – 900	1000 - 1200
Без обработки	0,75	0,65	0,45
Шлифование	1	1	1
Обтачивание	0,95	0,9	0,8
Обдирка	0,85	0,8	0,65
Закалка с нагревом токами высокой частоты	—	1,5 – 2,8	1,3 – 2,2
Азотирование	—	—	1,1 – 2,1
Цементация	1,8 – 3	—	—

*2.1.5. Коэффициенты, зависящие от соотношения пределов выносливости при симметричном и пульсирующем циклах напряжений  $\psi_\sigma$  и  $\psi_\tau$ , выбирают в соответствии с маркой материала:*

*$\psi_\sigma = 0,15$  - углеродистая сталь  $\sigma_b = 350 \dots 550$  МПа,*

*$\psi_\sigma = 0,2$  - углеродистая сталь  $\sigma_b = 650 \dots 750$  МПа,*

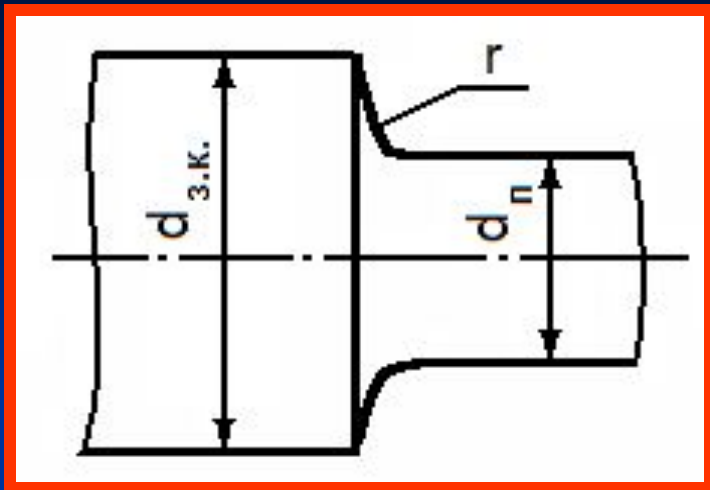
*$\psi_\sigma = 0,25 \dots 0,3$  - легированная сталь,*

*$\psi_\tau = 0,05$  - углеродистая сталь,*

*$\psi_\tau = 0,1$  - легированная сталь,*

*Подставляем значения в формулы, расчетное значение коэффициента запаса прочности сравниваем с допусаемым, если условие выполняется, тогда прочность вала в данном сечении обеспечена.*

## 2.2. Проверка прочности сечения в точке E:



Дано:

$$d_n = \dots$$

$$r =$$

$$M_{uE} = \dots$$

$$T_2 = \dots$$

$$\sigma_B = 520 \text{ МПа},$$

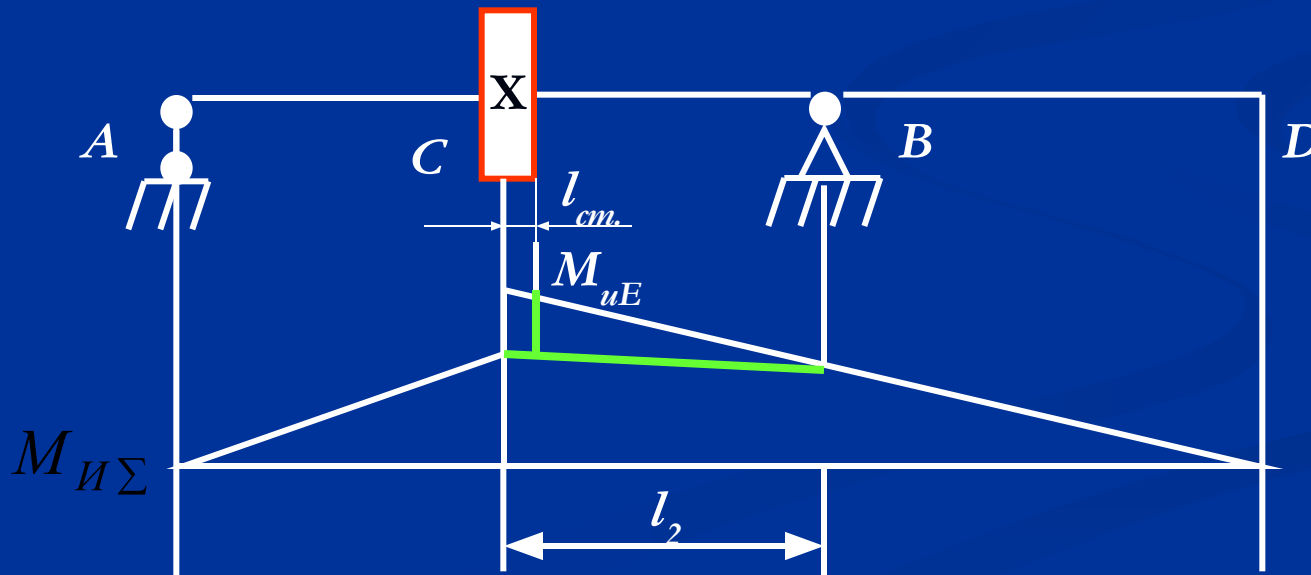
$$\sigma_m = 280 \text{ МПа},$$

$$\tau_T = 170 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{-1} = 250 \text{ МПа},$$

$$\tau_{-1} = 150 \text{ МПа}$$

$$r \approx 0,4 \cdot (d_{3.к.} - d_n)$$



*Напряжения изгиба изменяются по симметричному циклу, напряжения кручения – по отнулевому (пульсирующему) циклу:*

$$\sigma_a = \sigma_{И} = \frac{M_{И}}{W_{И.НЕТТО}}, \text{МПа};$$

$$\sigma_{ср.} = 0$$

$$\tau_a = \tau_{ср.} = \frac{\tau_K}{2} = \frac{T_2}{2 \cdot W_{К.НЕТТО}}, \text{МПа.}$$

2.2.1. Моменты сопротивления валов при изгибе  $W_{и.нетто}$  и кручении  $W_{к.нетто}$  для сплошного круглого сечения определяются :

$$W_{и.нетто} = \frac{\pi \cdot d_{з.к}^3}{32}, \text{ мм}^3$$

$$W_{к.нетто} = \frac{\pi \cdot d_{з.к}^3}{16}, \text{ мм}^3$$

2.2.2. Коэффициенты концентрации напряжений при изгибе  $K_\sigma$  и кручении  $K_\tau$  вала, с галтелью определяются:

$\frac{D}{d}$	$\frac{r}{d}$	К $\sigma$ при $\sigma_B$ , МПа						К $\tau$ $\sigma_B$ , МПа			
		$\leq 500$	600	700	800	900	$\geq 1000$	$\leq 700$	800	900	$\geq 1000$
$\leq 1,1$	0	2,32	2,5	2,71	—	—	—	1,52	1,63	1,72	1,83
	0,02	1,84	1,96	2,08	2,2	2,35	2,5	1,36	1,41	1,45	1,50
	0,04	1,60	1,66	1,69	1,75	1,81	1,87	1,24	1,27	1,29	1,32
	0,06	1,51	1,51	1,54	1,54	1,60	1,60	1,18	1,20	1,23	1,24
	0,08	1,40	1,40	1,42	1,42	1,46	1,46	1,14	1,16	1,18	1,19
	0,10	1,34	1,34	1,37	1,37	1,39	1,39	1,11	1,13	1,15	1,16
	0,15	1,25	1,25	1,27	1,27	1,30	1,30	1,07	1,08	1,09	1,11
	0,20	1,19	1,19	1,22	1,22	1,24	1,24	1,05	1,06	1,07	1,09
$>1,1-1,2$	0	2,85	3,10	3,39	—	—	—	1,85	2,04	2,18	2,37
	0,02	2,18	2,34	2,51	2,68	2,89	3,10	1,59	1,67	1,74	1,81
	0,04	1,84	1,92	1,97	2,05	2,13	2,22	1,39	1,45	1,48	1,52
	0,06	1,71	1,71	1,76	1,76	1,84	1,84	1,30	1,33	1,37	1,39
	0,08	1,56	1,56	1,59	1,59	1,64	1,64	1,22	1,26	1,30	1,31
	0,10	1,48	1,48	1,51	1,51	1,54	1,54	1,19	1,21	1,24	1,26
	0,15	1,35	1,35	1,38	1,38	1,41	1,41	1,11	1,14	1,15	1,18
	0,20	1,27	1,27	1,30	1,30	1,34	1,34	1,08	1,10	1,12	1,15
$>1,2-2$	0	3,20	3,50	3,85	—	—	—	2,15	2,40	2,60	2,85
	0,02	2,40	3,60	2,80	3,0	3,25	3,50	1,80	1,90	2,0	2,10
	0,04	2,0	2,10	2,15	2,25	2,35	2,45	1,53	1,60	1,65	1,70
	0,06	1,85	1,85	1,90	1,90	2,0	2,0	1,40	1,45	1,50	1,53
	0,08	1,66	1,66	1,70	1,70	1,76	1,76	1,30	1,35	1,40	1,42
	0,10	1,57	1,57	1,61	1,61	1,64	1,64	1,25	1,28	1,32	1,35
	0,15	1,41	1,41	1,45	1,45	1,49	1,49	1,15	1,18	1,20	1,24
	0,20	1,32	1,32	1,36	1,36	1,40	1,40	1,10	1,14	1,16	1,20

*2.2.3. Масштабные факторы при изгибе  $\varepsilon_\sigma$  и кручении  $\varepsilon_\tau$  для углеродистых сталей определяются из таблицы, в соответствии с пределом прочности и диаметром вала в данном сечении.*

Сталь	$\sigma_B$ , МПа	$\varepsilon_\sigma \sim \varepsilon_\tau$ при d, мм							
		10	20	30	40	50	70	100	200
Углеродистая	400 – 500	0,98	0,92	0,88	0,85	0,82	0,76	0,70	0,63
Углеродистая и легированная	500 – 800	0,97	0,89	0,85	0,81	0,78	0,73	0,68	0,61
Легированная	800 – 1200	0,95	0,86	0,81	0,77	0,77	0,74	0,65	0,59
Легированная	1200 – 1400	0,94	0,83	0,77	0,73	0,70	0,66	0,62	0,57



*2.2.4. Коэффициент  $\beta$ , зависящий от степени шероховатости поверхности (способ обработки) определяется по таблице, для качественных поверхностей способ обработки шлифование:*

Способ обработки	Значения $\beta$ при $\sigma_B$ , МПа		
	400 – 500	600 – 900	1000 - 1200
Без обработки	0,75	0,65	0,45
Шлифование	1	1	1
Обтачивание	0,95	0,9	0,8
Обдирка	0,85	0,8	0,65
Закалка с нагревом токами высокой частоты	—	1,5 – 2,8	1,3 – 2,2
Азотирование	—	—	1,1 – 2,1
Цементация	1,8 – 3	—	—

*2.2.5. Коэффициенты, зависящие от соотношения пределов выносливости при симметричном и пульсирующем циклах напряжений  $\psi_\sigma$  и  $\psi_\tau$ , выбирают в соответствии с маркой материала:*

*$\psi_\sigma = 0,15$  - углеродистая сталь  $\sigma_b = 350 \dots 550$  МПа,*

*$\psi_\sigma = 0,2$  - углеродистая сталь  $\sigma_b = 650 \dots 750$  МПа,*

*$\psi_\sigma = 0,25 \dots 0,3$  - легированная сталь,*

*$\psi_\tau = 0,05$  - углеродистая сталь,*

*$\psi_\tau = 0,1$  - легированная сталь,*

*Подставляем значения в формулы, расчетное значение коэффициента запаса прочности сравниваем с допусковым, если условие выполняется, тогда прочность вала в данном сечении обеспечена.*

*Предельные отклонения размеров отверстий и валов (по ГОСТ 2546-82) и колец подшипников качения класса точности O (по СТ СЭВ 773-77).*

Интервал размеров мм	Отверстия			Валы						Кольца подшип.	
	H7	H11	H14	r6	n6	p6	h8	f9	h14	внутр.	наруж.
Св. 18 до 30	+21 0	+130 0	+520 0	+15 +2	+28 +15	+35 +22	0 -33	-20 -72	0 -520	-10 0	-9 0
Св. 30 до 50	+25 0	+160 0	+620 0	+18 +2	+33 +17	+42 +26	0 -39	-25 -87	0 -620	-12 0	-11 0
Св. 50 до 80	+30 0	+190 0	+740 0	+21 +2	+39 +20	+51 +32	0 -46	-30 -104	0 -740	-15 0	-13 0
Св. 80 до 120	+35 0	+220 0	+870 0	+25 +3	+45 +23	+59 +37	0 -54	-36 -123	0 -870	-20 0	-15 0
Св. 120 до 180	+40 0	+250 0	+1000 0	+28 +3	+52 +27	+68 +43	0 -63	-43 -143	0 -1000	-25 0	-18 0
Св. 180 до 250	+46 0	+290 0	+1150 0	+33 +4	+60 +31	+79 +50	0 -72	-50 -165	0 -1150	— —	-25 0
Св. 250 до 315	+52 0	+320 0	+1300 0	+35 +4	+65 +34	+89 +56	0 -81	-56 -186	0 -1300	— —	— —
Св. 315 до 400	+57 0	+360 0	+1400 0	+40 +4	+73 +37	+98 +62	0 -89	-62 -202	0 -1400	— —	— —
Св. 400 до 500	+63 0	+400 0	+1550 0	+45 +5	+80 +40	+108 +68	0 -97	-68 -223	0 -1550	— —	— —