

## ДОПУСКАЕМЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ НА ВЫСТУПАЮЩИЙ КОНЕЦ ВАЛА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

При сопряжении двигателя с приводимым механизмом используются три основных вида передачи вращающего момента: упругой муфтой; клиновыми или плоскими ремнями; зубчатой передачей.

На вал двигателя, кроме вращающего момента, действуют поперечные (радиальные) и продольные (осевые) силы, создаваемые этими видами передач, вес ротора, включая среднюю часть вала, а также сила одностороннего магнитного притяжения.

При выборе двигателя в числе других параметров необходимо знать допускаемую нагрузку на выступающий конец вала, значение которой определяется следующими факторами: допускаемым прогибом вала; соотношением критической и номинальной частот вращения вала; допускаемым напряжением, определяемым материалом вала, долговечностью подшипников.

Принимается, что прогиб вала не должен превышать 10% номинального значения воздушного зазора между статором и ротором.

Критическая частота вращения вала должна быть не ниже 130% номинальной.

Расчёт прочности проводится на основе теории наибольших касательных напряжений. Приведённое напряжение  $\sigma$  в любом сечении вала должно удовлетворять условию  $\sigma \leq (\sigma_T)/1.5$ , где  $(\sigma_T)$  – предел текучести материала вала.

Долговечность подшипников, оцениваемая расчётной наработкой, установлена нормативной документацией на конкретные типы двигателей серии 4А. Расчётная наработка подшипников для двигателей основного исполнения согласно ГОСТ 19523-81 должна быть не менее 14000 часов.

Расчётная схема сил, действующих на вал электродвигателя, представлена на рис 4,1. На схеме приняты обозначения:

$F_r, F_a$  – соответственно радиальная и аксиальная нагрузки на выступающий конец вала.

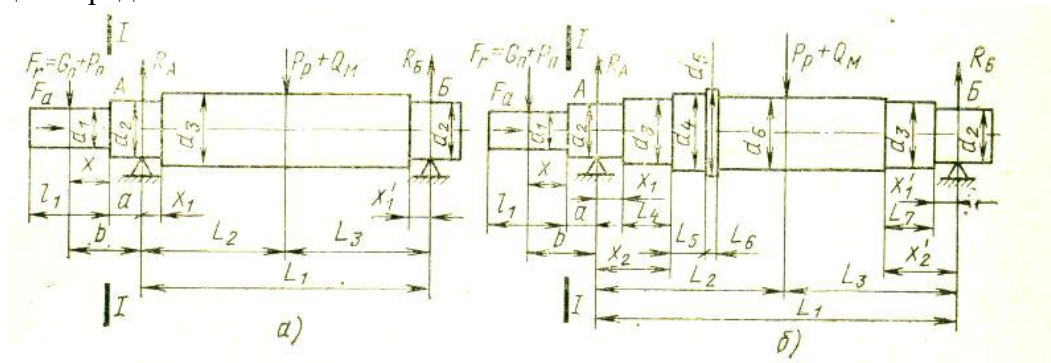
$P_p$  – вес ротора с валом.

$Q_m$  – сила одностороннего магнитного притяжения.

$R_A, R_B$  – реакции в подшипниках А и Б.

$G_n$  – вес полумуфты, шкива или шестерни.

$P_n$  – реакция передачи.



соприкосновения шкива с ремнём; при этом для клиноременной передачи  $R_0=d_p/2$ , где  $d_p$  – расчётный диаметр шкива по ГОСТ 20898-80,  $C_{\pi}=1.8$ . Для плоскоременной передачи  $C_{\pi}=3$  при частоте вращения до 1000 об/мин, при частоте вращения 1500 об/мин и мощности двигателя до 20 кВт  $C_{\pi}=5$ .

Расчёт вала на жёсткость проводят в следующей последовательности,

Прогиб вала посередине сердечника ротора от веса ротора, м

$$f_p = \frac{P_p}{3EL_1^2} (L_3^2 S_1 + L_2^2 S_2) \quad (4.2)$$

где  $E$  – модуль упругости материала вала, Па; для стали  $E=2,06 \cdot 10^{11}$  Па

Таблица 4.1 Основные исходные даны для механического расчёта вала двигателей с высотой оси вращения до 250 мм, степени защиты IP44 и IP23

Типоразмер электродвигателя	L <sub>1</sub> , мм	L <sub>2</sub> , мм	a, мм	d <sub>2</sub> , мм	d <sub>3</sub> , мм	P <sub>p</sub>				
						Синхронная частота вращения, об/мин				
						3000	1500	1000	750	600,500
4AA50A	102	56	14,5	10	14	4,8	5,7	--	--	--
4AA50B		52				5,4	6,5	--	--	--
4AA56A	114	52,5	15	12	17	4,8	6,7	--	--	--
4AA56B		57				5,6	7,8	--	--	--
4AA63A	129	60	15	15	20	6,7	9	10,8	--	--
4AA63B		64,5				7,6	10,3	15,7	--	--
4A71A	157	79	23	20	27	22,3	24,3	27,2	--	--
4A71B						24,3	26,3	33,6	29,2	--
4A80A	157	78,5	24,5	25	32	33,3	38,2	42,1	42,1	--
4A80B	177	88,5				39,2	46,1	54,9	50	--
4A90LA	201	100,5	24,5	25	32	49	57,8	68,9	63,7	--
4A90LB									77,9	--
4A100S	202	101	26	30	37	65,6	77,7	--	--	--
4A100L	232	116				80,2	95,1	96,7	99,7	--
4A112MA	249	124,5	32,5	35	43	98,2	123	115	115	--
4A112MB								133	138	--
4A132S	252	126	38	45	54	--	176	201	205	--
4A132M	302	151				170	225	260	264	--
4A, 4AH160S	354	177	44	50	60	249/223	334/308	396	386	--
4A, 4AH160M	397	198,5				277/268	421/376	502	489	--
4A, 4AH180S	385	192,5	45	60	70	329/325	485/443	--/445	--/520	--
4A, 4AH180M	425	212,5				382/363	574/531	522/531	575/629	--
4A, 4AH200M	458	229	53,5	65	75	455/482	693/671	713/695	713/865	--
4A, 4AH200L	498	249				517/557	818/800	797/765	797/990	--
4A, 4A225M	505	252,5	57,5	70	80	647/615	964/928	969/933	969/1060	--
4A, 4AH250S	571	285,5	59,5	85	100	930/892	1270/1180	1230/1270	1230/1270	1240
4A, 4AH250M	611	305,5				1036/998	1430/1260	1410/1445	1410/1445	1430

Примечание. В знаменателе указаны веса роторов двигателей со степенью защиты IP23

Таблица 4.2 Основные исходные данные для механического расчёта вала двигателей с высотами оси вращения 280-355 мм; степень защиты IP44

Типоразмер электро двигателя	L <sub>1</sub> , мм	L <sub>2</sub> , мм	L <sub>4</sub> , мм	L <sub>5</sub>					L <sub>6</sub> , мм	L <sub>7</sub> , мм
				Синхронная частота вращения, об/мин						
				3000	1500	1000	750	600,500		
4A280S	711	368	146	96,5	74	89	91,5	99	15	146
4A280M	751	388		102	84	91,5	79	114		
4A315S	783	391,5	98	128,5	108,5	116	86	128,5	15	98
4A315M	834	417		124	99	119	94	126,5		
4A355S	840	420	90	142,5	107,5	140	125	140	15	90
4A355M	900	450		137,5	82,5	132,5	130	140		

Продолжение табл.4.2

Типоразмер электродвигателя	a, мм	d <sub>1</sub> , мм	d <sub>2</sub> , мм	d <sub>4</sub> , мм	d <sub>5</sub> , мм	d <sub>6</sub> , мм	P <sub>p</sub> , Н
				Синхронная частота вращения, об/мин			

				3000	≤1500	3000	≤1500	3000	≤1550	3000	1500	1000	750	600, 500
4A280S	67,5	85	100	103	113	118	128	110	120	1610	2085	2234	2325	2350
4A280M										1745	2225	2470	2765	2500
4A315S	67,5	95	100	115	113	118	128	110	120	2050	2725	2960	3480	3175
4A315M										2275	2970	3225	3795	3565
4A355S	84	110	115	123	133	138	148	130	140	2815	3950	4255	4705	4890
4A355M										3125	4595	4880	5175	5555

Таблица 4.3 Основные исходные данные для механического расчёта вала двигателей с высо-  
тами оси вращения 280-355 мм, степень защиты IP23

Типоразмер электродви- гателя	L <sub>1</sub> , мм	L <sub>2</sub> , мм	L <sub>4</sub> , мм	L <sub>5</sub> , мм		L <sub>6</sub> , мм					L <sub>7</sub> , мм	a, мм	
				Синхронная частота вращения, об/мин									
				3000	≤150 0	300 0	150 0	100 0	750	600, 500			
4АН280S	681	325	75	115	105	20	30	32,5	12,5	32,5	74,5	67, 5	
4АН280М	721	345				17,5	35	30,5	17,5	35			
4АН315S	705	352,5	55	130		--	37,5	35	15	27,5	55	67	
4АН315М	755	377,5				62,5	42,5	37,5	20	32,5			
4АН355S	860	430	55	227		15,5	40	47,5	25	40	55	74	
4АН355М	920	460				18	35	50	15	32,5			

Продолжение таблицы 4.3

Типоразмер электродвига- теля	d <sub>2</sub> , мм	d <sub>3</sub> , мм	d <sub>4</sub> , мм		d <sub>5</sub> , мм		d <sub>6</sub> , мм		P <sub>п</sub> , Н				
			Синхронная частота вращения, об/мин										
			3000	≤1500	3000	≤1500	3000	≤1550	3000	1500	1000	750	600, 500
4АН280S	85	100	103	113	118	128	110	120	1540	1920	2000	2205	2275
4АН280М									1715	2080	2225	2420	2550
4АН315S	95	115	133		148		140		--	2510	2735	3350	3500
4АН315М									2195	2790	3010	3740	3960
4АН355S	110	125	133	143	148	156	140	150	2930	3590	3870	4520	4320
4АН355М									3150	4155	4470	5330	4730

Прогиб вала посередине сердечника ротора, м, от силы F<sub>т</sub>

$$f_n = \frac{F_r b}{3EL_1^2} [(1.5L_1 S_0 - S_1)L_3 + L_2 S_2] \quad (4.3)$$

Для определения S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub> составляют таблицу вспомогательных данных (табл. 4.4)

Таблица 4.4

Часть вала	Номер участков вала	d <sub>i</sub>	J <sub>i</sub> =πd <sub>i</sub> <sup>4</sup> /64	x <sub>i</sub>	x <sub>1</sub> <sup>3</sup>	x <sub>1</sub> <sup>3</sup> - x <sub>i-1</sub> <sup>3</sup>	(x <sub>i</sub> <sup>3</sup> - x <sub>i-1</sub> <sup>3</sup> )/J <sub>i</sub>	x <sub>i</sub> <sup>2</sup>	x <sub>i</sub> <sup>2</sup> - x <sub>i-1</sub> <sup>2</sup>	(x <sub>i</sub> <sup>2</sup> - x <sub>i-1</sub> <sup>2</sup> )/J <sub>i</sub>
Правая	1/2 ... m									
		$S_1 = \sum_{i=1}^m \frac{x_i^3 - x_{i-1}^3}{J_i}$							$S_0 = \sum_{i=1}^m \frac{x_i^2 - x_{i-1}^2}{J_i}$	
Левая	1 2 ... m									
		$S_2 = \sum_{i'=1}^{m'} \frac{x_{i'}^3 - x_{i'-1}^3}{J_{i'}}$								

Начальный расчётный эксцентриситет ротора, м, при горизонтальном расположении вала

$$e_0 = 0.1\delta + f_p + f_n \quad (4.4)$$

При вертикальном расположении вала

$$e_0 = 0.1\delta + f_n \quad (4.5)$$

Где  $\delta$ - воздушный зазор между статором и ротором, м, (см. гл.6)

Начальная сила одностороннего магнитного притяжения, Н, при числе полюсов  $2p=2$

$$Q_0 = D_{a2} l_2 \frac{e_0}{\delta} 10^5 \quad (4.6)$$

При числе полюсов  $2p>2$

$$Q_0 = 1.5 D_{a2} l_2 \frac{e_0}{\delta} 10^5 \quad (4.7)$$

Где  $D_{a2}$  и  $l_2$  – наружный диаметр и длина сердечника ротора, м;  $D_{a2} = D_i - 2\delta$ , Внутренний диаметр сердечника статора  $D_{i1}$  и длина сердечника ротора, приближённо равная длине сердечника статора, приведены в гл. 6.

Прогиб вала, м, от силы одностороннего магнитного притяжения  $Q_0$  при горизонтальном расположении вала

$$f_0 = \frac{f_p Q_0}{P_p} \quad (4.8)$$

При вертикальном положении вала

$$f_0 = \frac{Q_0}{3EL^2} (L_3^2 S_1 + L_2^2 S_2) \quad (4.9)$$

Установившейся прогиб вала, м, от силы одностороннего магнитного притяжения

$$f_m = \frac{f_0}{1-m} \quad (4.10)$$

$$\text{Где } m = \frac{f_0}{e_0}$$

Сила установившегося одностороннего магнитного притяжения, Н

$$Q_M = \frac{Q_0}{1-m} \quad (4.11)$$

Суммарный прогиб вала посередине сердечника ротора, м, при горизонтальном положении вала

$$f = f_p + f_u + f_m \quad (4.12)$$

При вертикальном положении вала

$$f = f_n + f_m \quad (4.13)$$

Критическая частота вращения, об/мин

$$n_{kp} = 30 \sqrt{\frac{(1-m)}{f_p}} \quad (4.14)$$

Расчёт вала на прочность проводится в наиболее опасном сечении 1-1(рис. 4.1), а при горизонтальном положении вала также проверяется напряжение в точке приложения сил  $P_p$  и  $Q_m$ ,

При совместном действии изгиба и кручения приведённое напряжение в  $i$ -м сечении вала, Па, равно:

$$\sigma_i = \sqrt{M_{изги}^2 + \frac{(\alpha k_m M_{ном})^2}{W_i}} \quad (4.15)$$

Где  $k_m$  – коэффициент перегрузки по моменту;  $\alpha=0.8$  для реверсивных двигателей;  $W_i=0,1d_i^3$  – момент сопротивления при изгибе.

Изгибающий момент в сечении 1-1, Нм,

$$M_{изг11} = k_m F_r b \left(1 - \frac{L_2}{L_1}\right) + (P_p + Q_M) \frac{L_3}{L_1} L_2 \quad (4.17)$$

При расчёте момента сопротивления  $W_i$  в указанных сечениях значение диаметра вала  $d_i$  уменьшают на глубину шпоночного паза,

Расчёт долговечности подшипников проводят в такой последовательности.

Наибольшая радиальная нагрузка на подшипник со стороны выступающего конца вала  $A$ , Н, при горизонтальном положении вала

$$R_A = k_M F_r (1 + \frac{b}{L_1}) + (P_p + Q_M) \frac{L_3}{L_1} \quad (4.18)$$

При вертикальном положении вала

$$R_A = k_M F_r (1 + \frac{b}{L_1}) + Q_M \frac{L_3}{L_1} \quad (4.19)$$

Наибольшая радиальная нагрузка на подшипник Б, Н, при горизонтальном положении вала

$$R_B = k_M F_r \frac{b}{L_1} + (P_p + Q_M) \frac{L_2}{L_1} \quad (4.20)$$

При вертикальном положении вала

$$R_B = k_M F_r \frac{b}{L_1} + Q_M \frac{L_2}{L_1} \quad (4.21)$$

Расчёт долговечности подшипников закреплённой опоры (опора Б на рис. 4.1) проводится по приведённой динамической нагрузке  $Q_B$ , Н, которая для радиальных однорядных шарикоподшипников, установленных в серии 4А равна:

$$Q_B = R_B K_B K_T \text{ при } \frac{A_B}{R_B} \leq e \quad (4.22)$$

$$Q_B = (0.56 R_B + Y A_B) K_B K_T \text{ при } \frac{A_B}{R_B} > e \quad (4.23)$$

Здесь  $A_B$  – усилие, создаваемое пружиной осевого поджатия, Н,

При горизонтальной установке двигателя

$$A_B = F_a + A_0 \quad (4.24)$$

При вертикальной установке двигателя

$$A_B = P_p + G_n + F_a + A_0 \quad (4.25)$$

$K_\delta$  – коэффициент безопасности, для асинхронных двигателей общего назначения  $K_\delta$  принимается равным 1,2;  $K_T$  – температурный коэффициент, для подшипников, работающих при температуре, не превышающей 100°C,  $K_T=1$ .

Значения коэффициентов  $Y$  и  $e$  приведены в таблице 4.5

Таблица 4.5

$F_a/C_0$	$Y$	$e$	$F_a/C_0$	$Y$	$e$	$F_a/C_0$	$Y$	$e$
0,014	2,3	0,19	0,084	1,55	0,28	0,28	1,15	0,38
0,028	1,99	0,22	0,11	1,45	0,3	0,42	1,04	0,42
0,056	1,73	0,26	0,17	1,31	0,34	0,56	1	0,44

$C_0$  – статистическая грузоподъёмность подшипника, Н.

Таблица 4.6. Значения номинальной долговечности шарикоподшипников

$L_h$ , ч	C/Q при частоте вращения, об/мин										
	500	600	720	750	900	1000	1200	1500	1800	3000	3600
1000	3,11	3,3	3,51	3,56	3,78	3,91	4,16	4,48	4,76	5,65	6
2000	3,91	4,16	4,42	4,48	4,76	4,93	5,24	5,65	6	7,11	7,56
3000	4,48	4,76	5,06	5,13	5,45	5,65	6	6,46	6,87	8,14	8,65
4000	4,93	5,24	5,57	5,65	6	6,21	6,6	7,11	7,56	8,96	9,52
5000	5,31	5,65	6	6,08	6,46	6,69	7,11	7,66	8,14	9,65	10,26
6000	5,65	6	6,37	6,46	6,87	7,11	7,56	8,14	8,65	10,26	10,9
7000	5,94	6,32	6,71	6,8	7,23	7,49	7,96	8,57	9,11	10,8	11,48
8000	6,21	6,6	7,02	7,11	7,56	7,83	8,32	8,96	9,52	11,29	12
9000	6,46	6,87	7,3	7,4	7,86	8,14	8,65	9,32	9,9	11,74	12,48
10000	6,69	7,11	7,56	7,66	8,14	8,43	8,96	9,65	10,26	12,16	12,93
11000	6,91	7,34	7,8	7,91	8,41	8,71	9,25	9,97	10,59	12,56	13,34
12000	7,11	7,56	8,03	8,14	8,65	8,96	9,52	10,26	10,9	12,93	13,74
13000	7,31	7,76	8,25	8,36	8,89	9,21	9,78	10,54	11,20	13,28	14,11
14000	7,49	7,96	8,45	8,57	9,11	9,44	10,03	10,8	11,48	13,61	14,46
15000	7,66	8,14	8,65	8,77	9,32	9,65	10,26	11,05	11,75	13,93	14,80
16000	7,83	8,32	8,84	8,96	9,52	9,86	10,48	11,29	12	14,23	15,12
17000	7,99	8,49	9,02	9,15	9,72	10,07	10,7	11,52	12,24	14,52	15,43

18000	8,14	8,65	9,2	9,32	9,91	10,26	10,9	11,75	12,48	14,8	15,72
19000	8,29	8,81	9,36	9,49	10,09	10,45	11,1	11,96	12,71	15,07	16,01
20000	8,43	8,96	9,52	9,65	10,26	10,63	11,29	12,16	12,93	15,33	16,28
21000	8,57	9,11	9,68	9,81	10,43	10,8	11,48	12,36	13,14	15,58	16,55
22000	8,71	9,25	9,83	9,97	10,59	10,97	11,66	12,56	13,34	15,82	16,81
23000	8,84	9,39	9,98	10,12	10,75	11,13	11,83	12,74	13,54	16,06	17,06
24000	8,96	9,52	10,12	10,26	10,9	11,29	12	12,93	13,74	16,29	17,31
25000	9,08	9,65	10,26	10,4	11,05	11,45	12,16	13,10	13,92	16,,51	17,54
26000	9,2	9,78	10,39	10,54	11,2	11,6	12,32	13,28	14,11	16,73	17,78
27000	9,32	9,9	10,53	10,67	11,34	11,74	12,48	13,44	14,29	16,94	18
28000	9,43	10,03	10,65	10,8	11,48	11,89	12,63	13,61	14,46	17,15	18,22
29000	9,55	10,14	10,78	10,93	11,61	12,03	12,78	13,77	14,63	17,35	18,43
30000	9,65	10,26	10,9	11,05	11,74	12,16	12,93	13,92	14,8	17,54	18,64
35000	10,16	10,8	11,48	11,63	12,36	12,81	13,61	14,65	15,58	18,47	19,63
40000	10,63	11,29	12	12,16	12,93	13,08	14,23	15,33	16,29	19,31	20,52

Таблица 4.7. Значения номинальной долговечности роликоподшипников

L <sub>н</sub> , ч	C/Q при частоте вращения, об/мин										
	500	600	720	750	900	1000	1200	1500	1800	3000	3600
1000	2,77	2,93	3,1	3,13	3,31	3,42	3,61	3,86	4,07	4,75	5,02
2000	3,42	3,61	3,81	3,86	4,07	4,2	4,44	4,75	5,02	5,85	6,18
3000	3,86	4,07	4,3	4,36	4,6	4,75	5,02	5,36	5,67	6,6	6,97
4000	4,2	4,44	4,69	4,75	5,02	5,18	5,47	5,85	6,17	7,2	7,6
5000	4,5	4,75	5,02	5,08	5,36	5,53	5,85	6,25	6,6	7,7	8,13
6000	4,75	5,02	5,3	5,36	5,67	5,85	6,17	6,6	6,97	8,13	8,59
7000	4,97	5,25	5,55	5,62	5,93	6,12	6,46	6,92	7,3	8,51	8,99
8000	5,18	5,47	5,78	5,85	6,17	6,37	6,73	7,2	7,6	8,86	9,36
9000	5,36	5,66	5,98	6,06	6,40	6,6	6,97	7,46	7,88	9,18	9,7
10000	5,53	5,85	6,17	6,25	6,6	6,82	7,2	7,7	8,13	9,48	10,01
11000	5,69	6,02	6,35	6,43	6,79	7	7,41	7,92	8,36	9,75	10,3
12000	5,85	6,17	6,52	6,6	6,97	7,2	7,6	8,13	8,59	10,01	10,57
13000	5,99	6,33	6,68	6,76	7,14	7,37	7,79	8,33	8,79	10,25	10,82
14000	6,12	6,46	6,83	6,92	7,3	7,54	7,96	8,51	8,99	10,48	11,07
15000	6,25	6,6	6,97	7,06	7,46	7,7	8,13	8,69	9,18	10,7	11,30
16000	6,37	6,73	7,11	7,2	7,6	7,85	8,29	8,86	9,36	10,91	11,52
17000	6,49	6,86	7,24	7,33	7,74	7,99	8,44	9,02	9,53	11,11	11,73
18000	6,6	6,97	7,36	7,46	7,88	8,13	8,59	9,18	9,7	11,3	11,94
19000	6,71	7,09	7,49	7,58	8	8,26	8,73	9,33	9,85	11,49	12,13
20000	6,82	7,20	7,6	7,7	8,13	8,39	8,86	9,48	10,01	11,66	12,32
21000	6,92	7,30	7,71	7,81	8,25	8,51	8,99	9,61	10,16	11,84	12,5
22000	7	7,41	7,82	7,92	8,36	8,63	9,12	9,75	10,3	12	12,68
23000	7,11	7,51	7,93	8,03	8,48	8,75	9,24	9,88	10,43	12,16	12,85
24000	7,2	7,6	8,03	8,13	8,59	8,86	9,36	10,01	10,57	12,32	13,01
25000	7,29	7,7	8,13	8,23	8,69	8,97	9,48	10,13	10,7	12,47	13,17
26000	7,37	7,79	8,22	8,33	8,79	9,08	9,59	10,25	10,82	12,62	13,33
27000	7,46	7,88	8,32	8,42	8,89	9,18	9,7	10,37	10,95	12,76	13,48
28000	7,54	7,96	8,41	8,51	8,99	9,28	9,8	10,48	11,07	12,9	13,63
29000	7,62	8,05	8,5	8,6	9,09	9,38	9,91	10,59	11,19	13,04	13,77
30000	7,7	8,13	8,59	8,69	9,18	9,48	10,01	10,7	11,3	13,17	13,91
35000	8,06	8,51	8,99	9,1	9,61	9,91	10,48	11,2	11,84	13,8	14,57
40000	8,39	8,86	9,36	9,48	10,01	10,33	10,91	11,66	12,32	14,36	15,17

Для «плавающей» опоры (опора А), если установлен радиальный однорядный шарикоподшипник, приведённая динамическая нагрузка  $Q_A$  вычисляется по (4.22), (4.23) при этом  $A_A=A_0$ , если вал расположен горизонтально, и  $A_A=0$ , если вал расположен вертикально.

Для однорядных радиальных роликоподшипников с короткими цилиндрическими роликами, установленных на опоре А.

$$Q_A = R_A K_\delta K_T \quad (4.26)$$

Номинальная долговечность подшипников, млн, оборотов.

$$L = \left(\frac{C}{Q}\right)^{\alpha} \quad (4.27a)$$

Или в часах

$$L_h = \left(\frac{C}{Q}\right)^{\alpha} \frac{10^6}{60\pi} \quad (4.27 б)$$

Где С- динамическая грузоподъёмность подшипника, Н; Q- приведённая динамическая нагрузка, Н; Показатель степени  $\alpha=3$  для шариковых подшипников,  $\alpha=10/3$  для роликовых. Значения динамической С и статической  $C_0$  грузоподъёмностей приведены в каталожных и справочных данных на подшипники (1). По найденному значению  $C/Q$  и табл. 4.6 или 4.7 определяется долговечность подшипников в зависимости от номинальной частоты вращения двигателя,

**Таблица 4.8 Типы подшипников, применяемых в двигателях серии 4А**

Высота оси вращения, мм	Сторона основного выступающего конца вала		Противоположная сторона
	Группа конструктивных исполнений по способу монтажа (ГОСТ2479-79)		
	IM1	IM2, IM3	IM1,IM2,IM3
50	180 500	180 500	180 500
56	180 501	180 501	180 501
63	180 502	180 502	180 502
71	180 604	180 604	180 604
80	180 605	180 605	180 605
90	180 605	180 605	180 605
100	180 606	180 606	180 606
112	180 607	180 607	180 607
132	180 609	180 609	180 609
160*	2310	310	310
180*	2312	312	312
200*	2313	313	313
225*	2314	314	314
250*	2317	317	317
280	2317	2317	317
315	2319	--	319
355	2322	--	322

\* -В двигателях с высотами оси вращения 160-250 мм при  $2p=2$  с обеих сторон установлены шарикоподшипники.

Принимая предельными значения прогиба вала ( $f=0,1\delta$ ), критической частоты вращения ( $n_{кр}=1,3 n_{ном}$ ), приведённого напряжения в наиболее нагруженном сечении вала ( $\sigma=(\sigma_T)/1.5$ ) и задаваясь долговечностью подшипников (табл. 4.8)  $L_h=20000$  ч, можно рассчитать предельно допускаемые усилия на выступающий конец вала двигателей 4А основного исполнения всех высот оси вращения.

На рис 4.2-4.18 представлены зависимости предельно допускаемой радиальной нагрузки на выступающий конец вала от точки её приложения  $F_r=f(x)$ , рассчитанные при условиях  $F_a=0$  и  $k_m=1$ , Расстояние  $x$  (см. рис 4.1) от заплечика выступающего конца до точки приложения силы  $F_r$  изменяется от  $x=0$  до  $x=l_1 + l/2l_{in} + B$ , где  $l_{in}$  – длина упругой втулки втулочно-пальцевой муфты,  $B$  – монтажный зазор между полумуфтами.

На рис, 4,19-3,35 представлены зависимости предельно допустимой аксиальной нагрузки от действующей радиальной  $F_a=f(F_r)$ , приложенной посредине выступающего конца вала ( $x/l_1=0/5$ ). Сплошной линией даны зависимости для горизонтального расположения вала и штриховой - для вертикального.

Для двигателей с высотами осей вращения 160-280 мм и степенью защиты IP23 допускается использовать те же кривые, что и для соответствующих типоразмеров двигателей со степенью защиты IP44. При этом для защищённых двигателей с высотами оси вращения и синхронными частотами вращения, указанными в табл. 4.9, при определении предельно допускаемых усилий сле-

дует вводит поправки (знак «-» означает, что радиальная и аксиальная нагрузки должны быть уменьшены, «+» - что они могут быть увеличены на указанные значения)

Таблица 4.9

Высота оси вращения, мм	Синхронная частота вращения, об/мин	Поправка, кН	
		$\Delta F_r$	$\Delta F_a$
180	750	-0,2	-0,1
200	1000	-0,18	-0,08
	750	-0,44	-0,2
225	1000	-0,2	-0,1
250	1500	+0,15	+0,05
	1000	-0,2	-0,1
	750	-0,1	-0,05
280	1500	+0,18	+0,04
	1000	+0,22	+0,06
	750	+0,24	+0,07
	600	-0,08	--

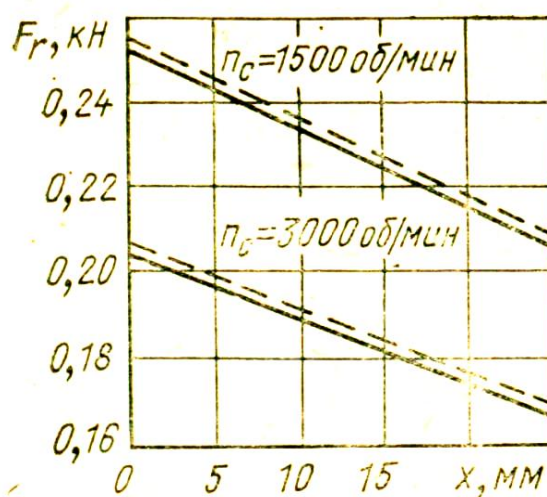


Рис 4.2  $F_r=f(x)$  для двигателей с  $h=50$  мм

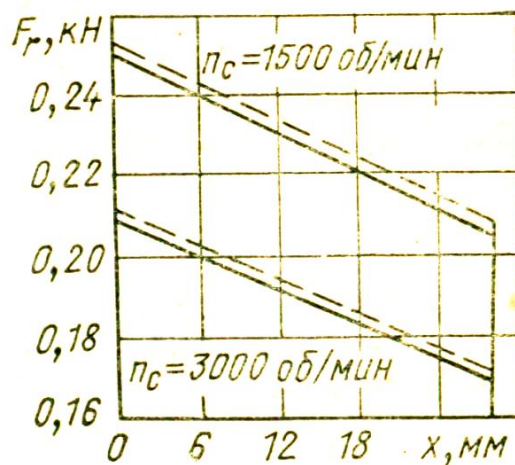


Рис 4,3  $F_r=f(x)$  для двигателей с  $h=56$  мм



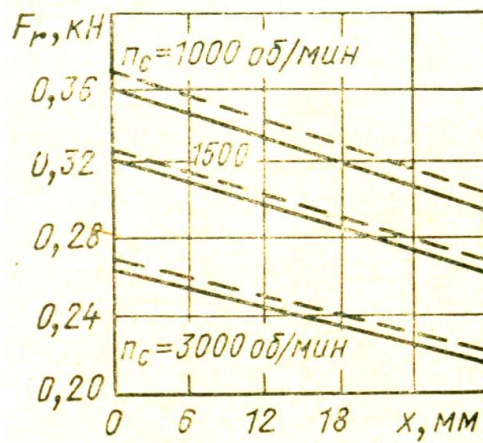


Рис 4.4  $F_T=f(x)$  для двигателей с  $h=63$  мм

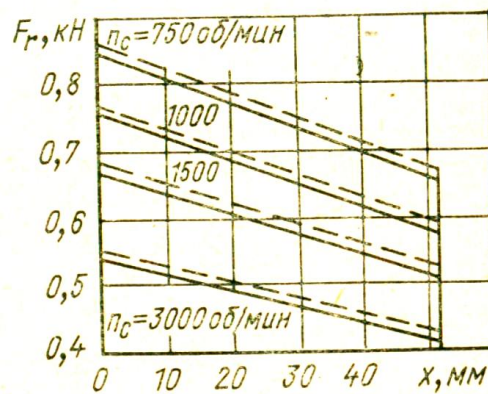


Рис 4.5  $F_T=f(x)$  для двигателей с  $h=71$  мм

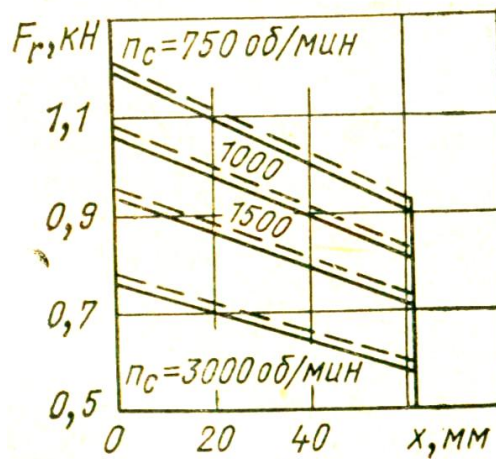


Рис 4.6  $F_T=f(x)$  для двигателей с  $h=80$  мм

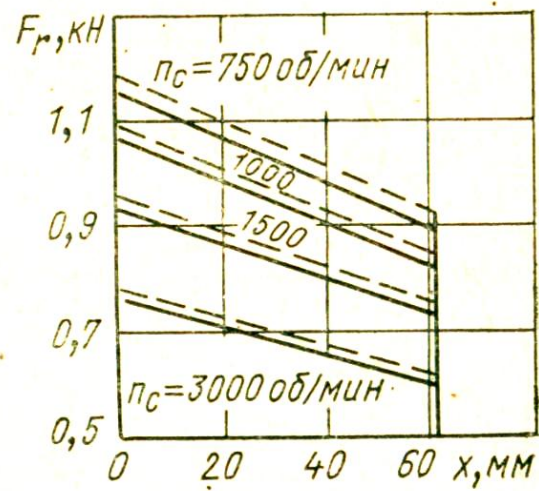


Рис 4.7  $F_r=f(x)$  для двигателей с  $h=90$  мм

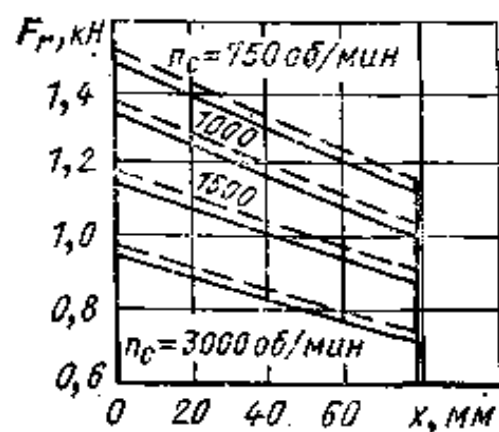


Рис. 4.8.  $F_r = f(x)$  для двигателей с  $h=100$  мм.

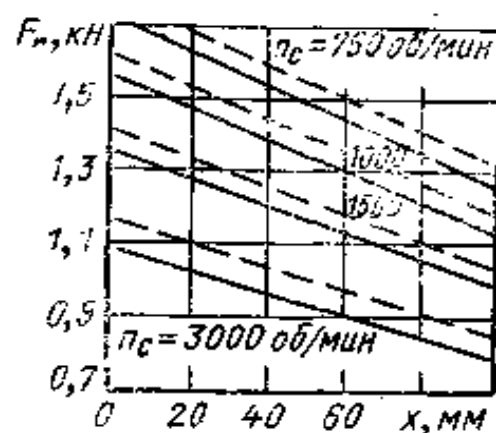


Рис. 4.9.  $F_r = f(x)$  для двигателей с  $h=112$  мм.

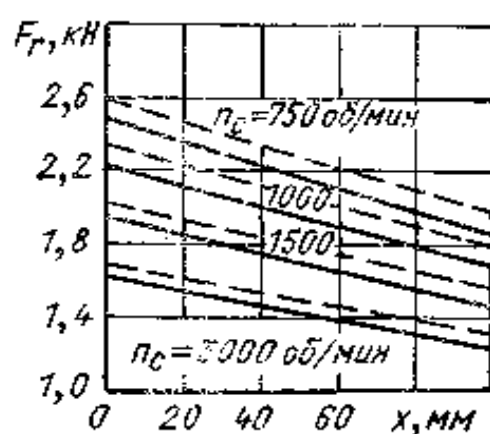


Рис. 4.10.  $F_r = f(x)$  для двигателей с  $h=132$  мм.

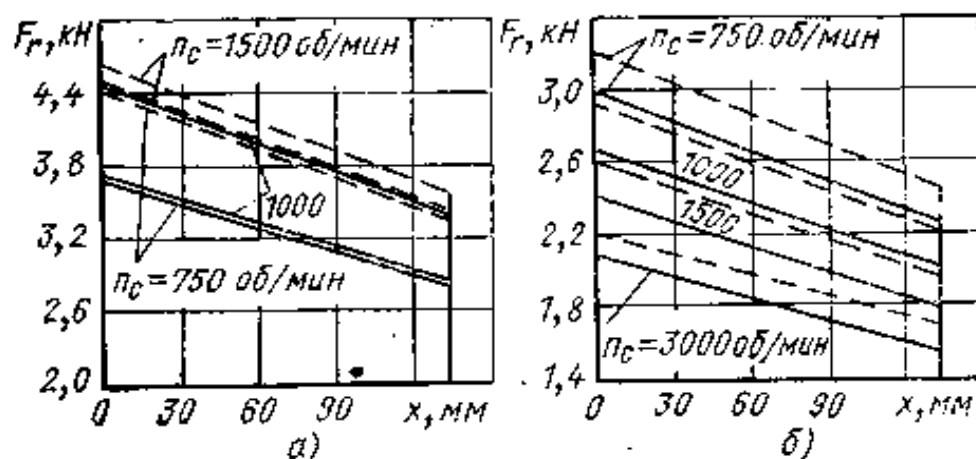


Рис. 4.11.  $F_r = f(x)$  для двигателей с  $h=160$  мм и степенью защиты IP44.

а — со стороны выступающего конца вала — роликоподшипник; б — со стороны выступающего конца вала — шарикоподшипник.

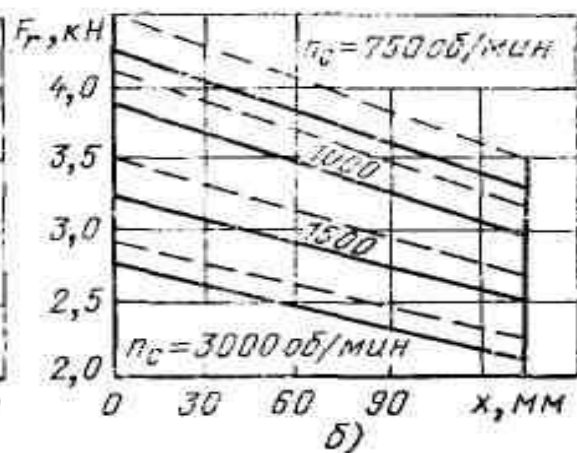
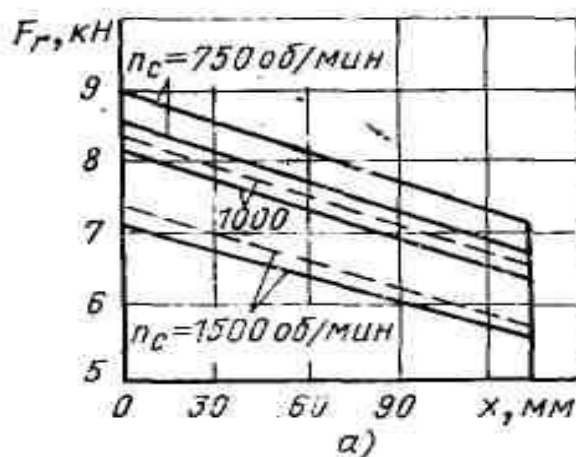


Рис. 4.12. То же, что и на рис. 4.11, с  $h = 180$  мм.

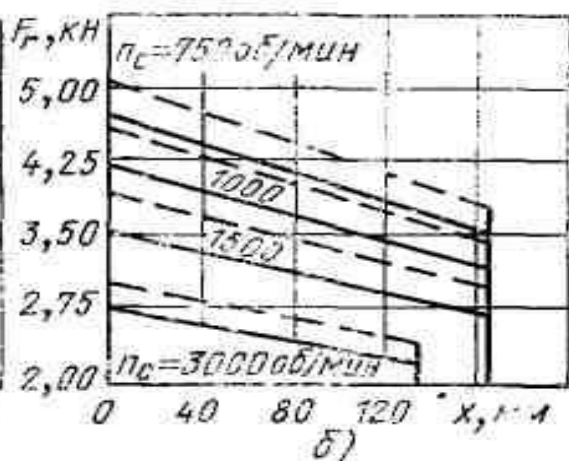
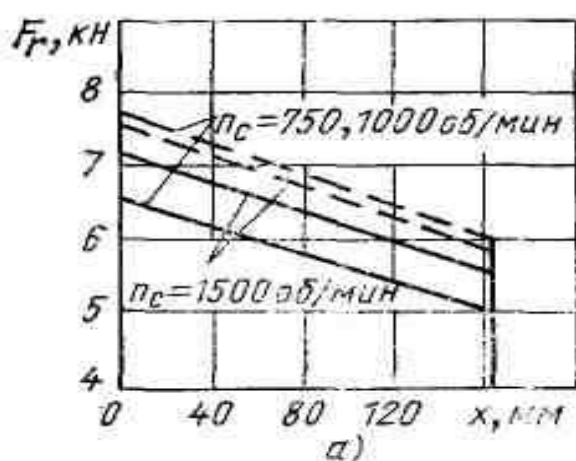


Рис. 4.13. То же, что и на рис. 4.11, с  $h = 200$  мм.

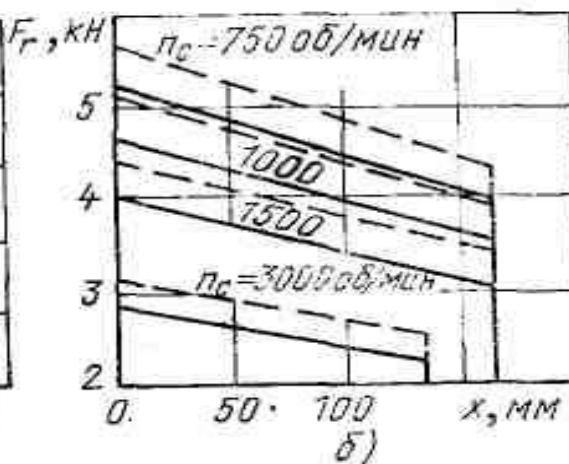
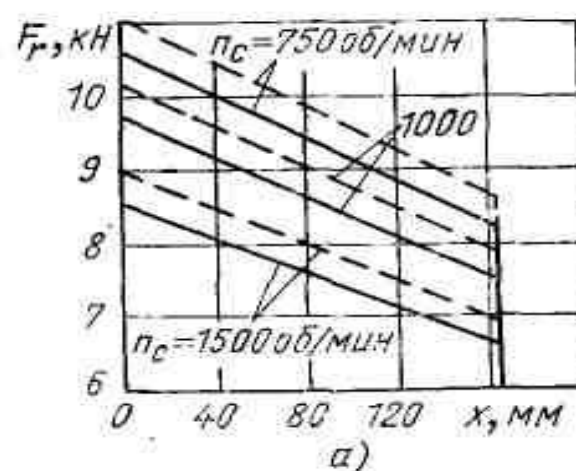


Рис. 4.14. То же, что и на рис. 4.11, с  $h = 225$  мм.

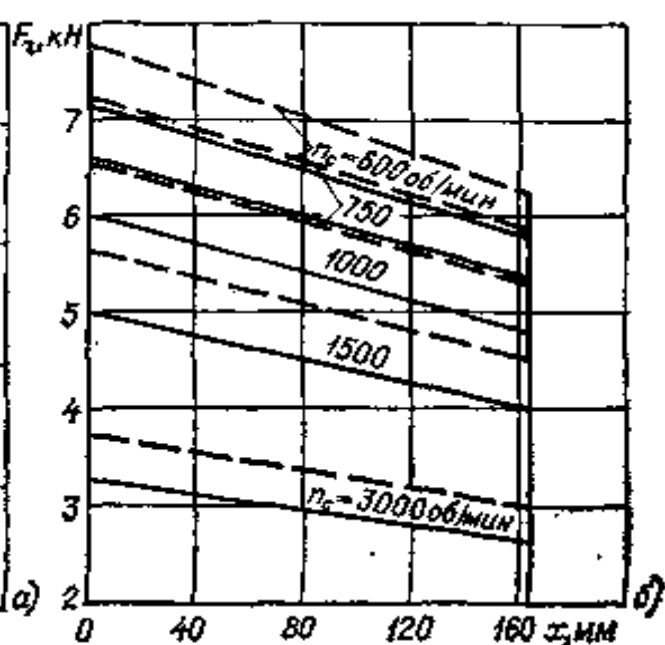
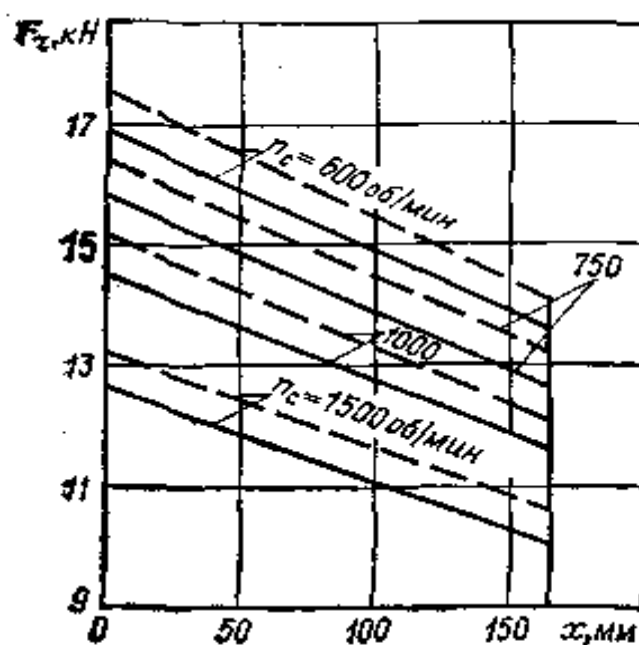


Рис. 4.15. То же, что и на рис. 4.11, с  $h=250$  мм.

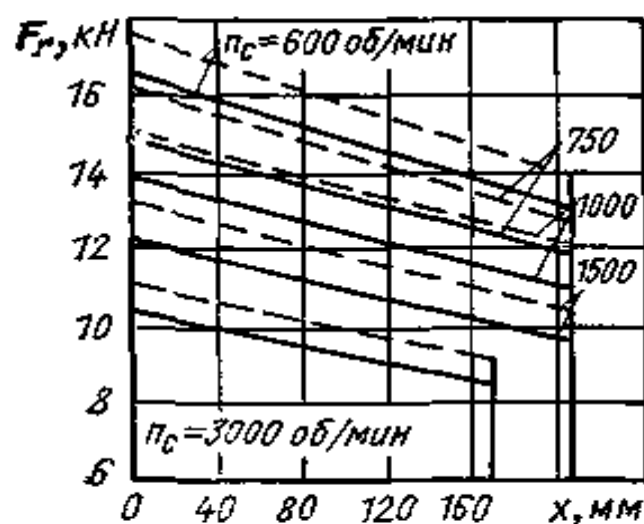


Рис. 4.16.  $F_z=f(x)$  для двигателей с  $h=280$  мм и степенью защиты IP44.

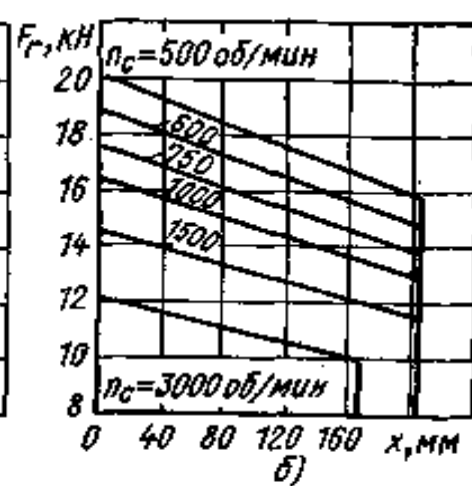
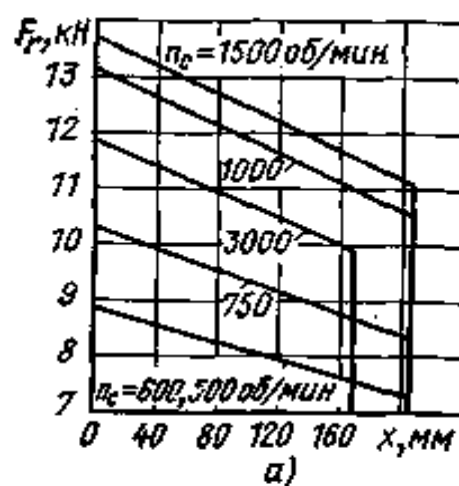


Рис. 4.17.  $F_z=f(x)$  для двигателей с  $h=315$  мм.  
а — со степенью защиты IP44; б — со степенью защиты IP23.

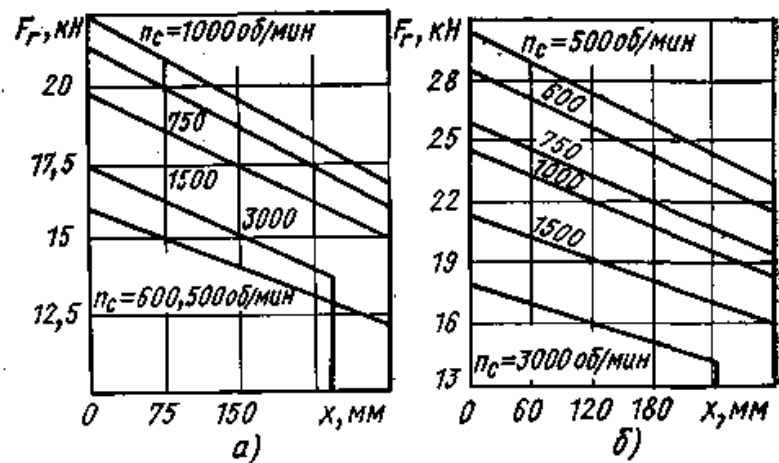


Рис. 4.18.  $F_r=f(x)$  для двигателей с  $h=355$  мм.  
а — со степенью защиты IP44; б — со степенью защиты IP23.

Зависимость расчетной долговечности подшипников от предельно допускаемой радиальной нагрузки  $L_h=f(F_r)$ , приложенной посредине выступающего конца вала ( $x/l_1=0,5$ ), приведена на рис. 4.36—4.52. Эти зависимости рассчитаны при  $k_m=1$  и наиболее употребительном для асинхронных электродвигателей диапазоне долговечности подшипников от 10 000 до 40 000 ч.

В ряде случаев предельно допускаемая радиальная нагрузка, начиная с некоторого значения  $F'_r$ , определяется не долговечностью подшипников, а жесткостью вала (рис. 4.46,а и 4.46,б при  $n_c=1000$  об/мин, рис. 4.47,б при  $n_c=1000$  и 750 об/мин и т. д.). Тогда кривая  $L_h=f(F_r)$  при  $F_r=F'_r$  переходит в прямую, параллельную оси ординат. Для ряда двигателей со степенью защиты IP44 при установке со стороны привода роликподшипника предельно допускаемая радиальная нагрузка определяется жесткостью вала, в связи с чем долговечность подшипников превышает 40 000 ч. Значения предельно допускаемых радиальных нагрузок для этих двигателей могут быть взяты из табл. 4.10 или из соответствующих кривых  $F_r=f(x)$  при  $x=0,5l_1$ .

Таблица 4.10

Высота оси вращения, мм	Синхронная частота вращения, об/мин	$F_r$ , кН, при расположении вала	
		горизонтальном	вертикальном
160	1000	3,35	4,00
	750	3,40	4,00
200	1000	5,90	-
	750	5,90	-
315	750	9,50	-
	600	8,20	-
	500	8,20	-
355	600	14,6	-
	500	14,6	-

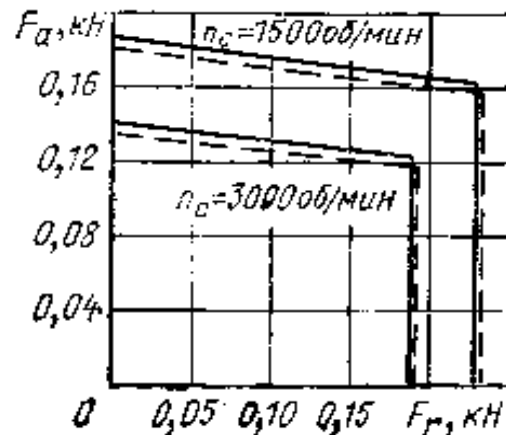


Рис. 4.19.  $F_a = f(F_r)$  для двигателей с  $h=50$  мм.

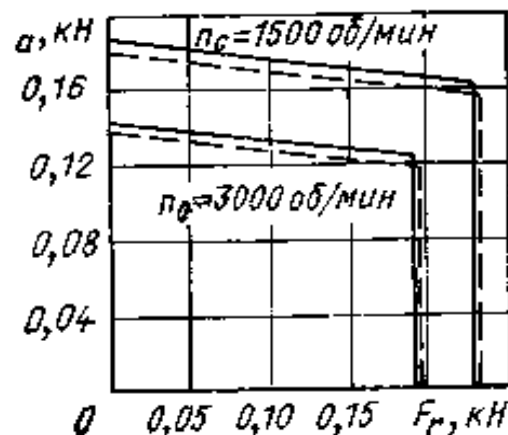


Рис. 4.20.  $F_a = f(F_r)$  для двигателей с  $h=56$  мм.

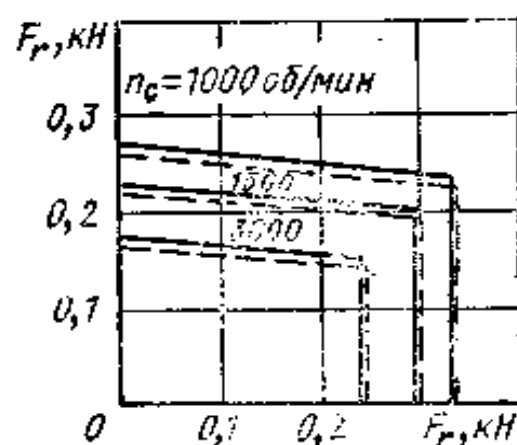


Рис. 4.21.  $F_a = f(F_r)$  для двигателей с  $h=63$  мм.

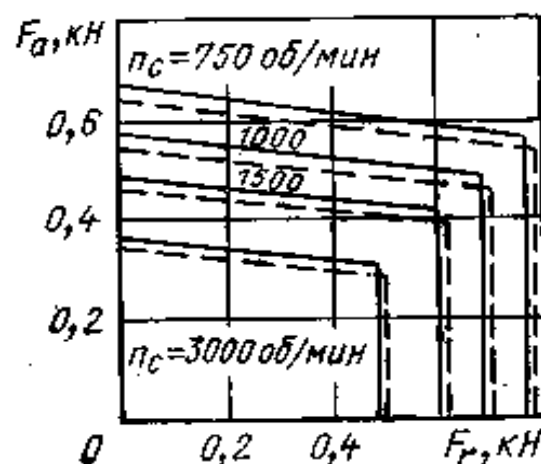


Рис. 4.22.  $F_a = f(F_r)$  для двигателей с  $h=71$  мм.

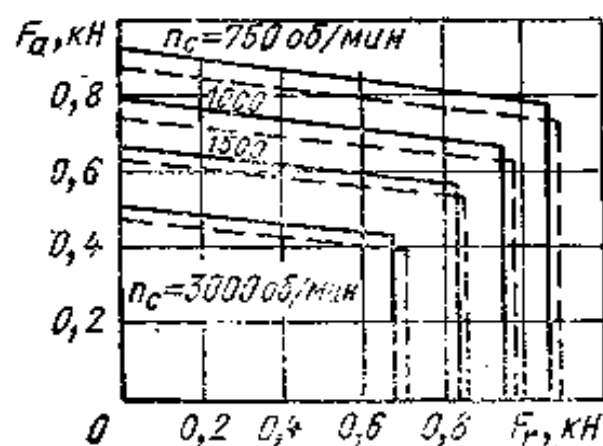


Рис. 4.23.  $F_a = f(F_r)$  для двигателей с  $h=80$  мм.

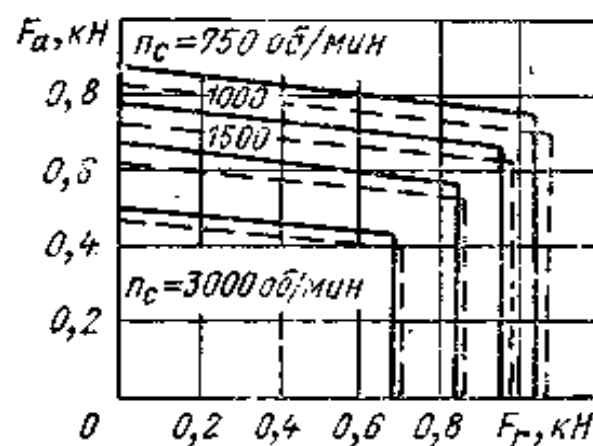


Рис. 4.24.  $F_a = f(F_r)$  для двигателей с  $h=90$  мм.

Рис. 4.25.  $F_a = f(F_r)$  для двигателей с  $h=100$  мм.

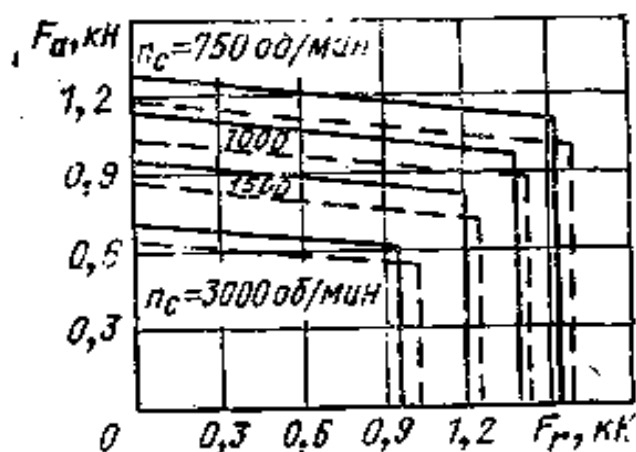
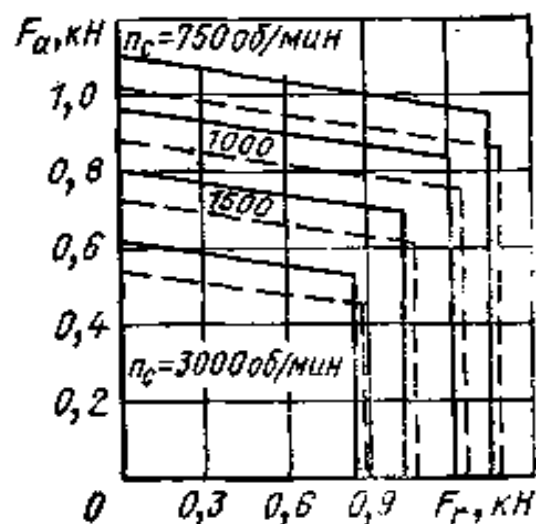


Рис. 4.26.  $F_a = f(F_r)$  для двигателей с  $h=112$  мм.

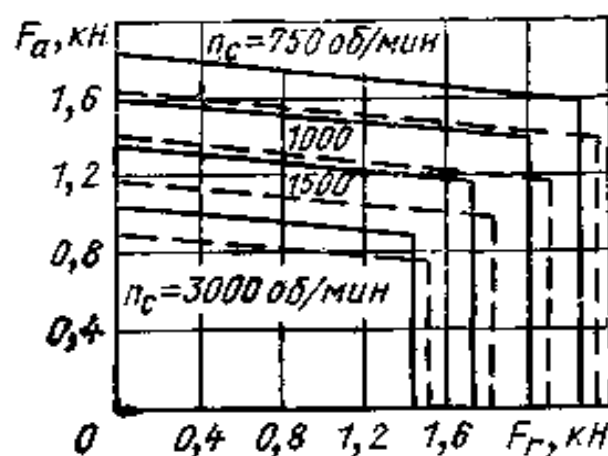


Рис. 4.27.  $F_a = f(F_r)$  для двигателей с  $h=132$  мм.

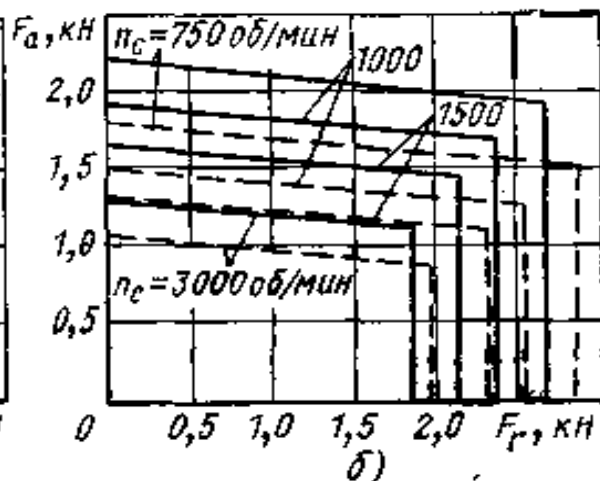
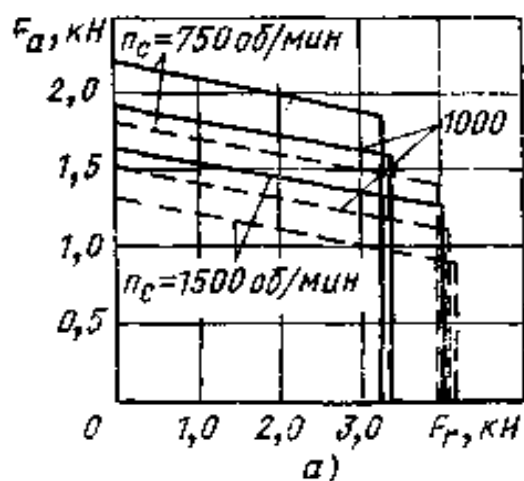


Рис. 4.28.  $F_a = f(F_r)$  для двигателей с  $h=160$  мм и степенью защиты IP44.

а — со стороны выступающего конца вала — роликоподшипник; б — со стороны выступающего конца вала — шарикоподшипник.



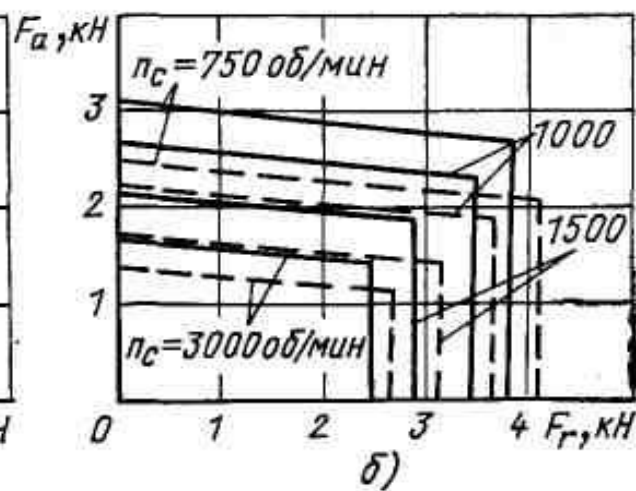
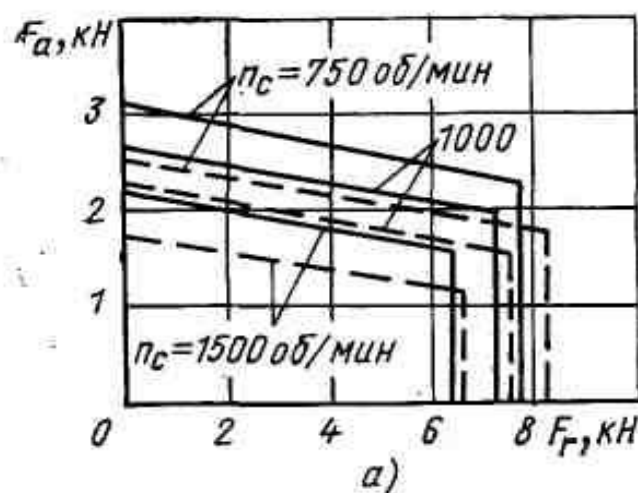


Рис. 4.29. То же, что и на рис. 4.28, с  $h=180$  мм.

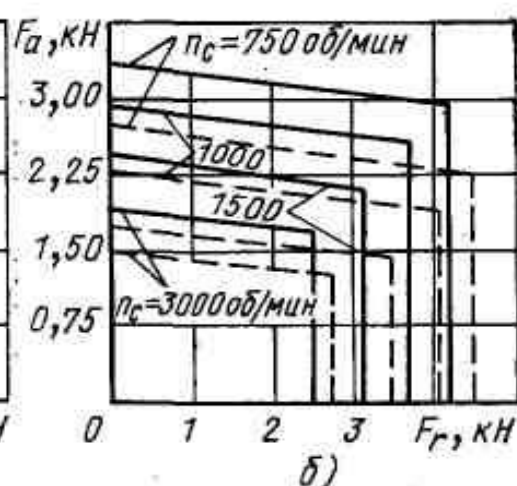
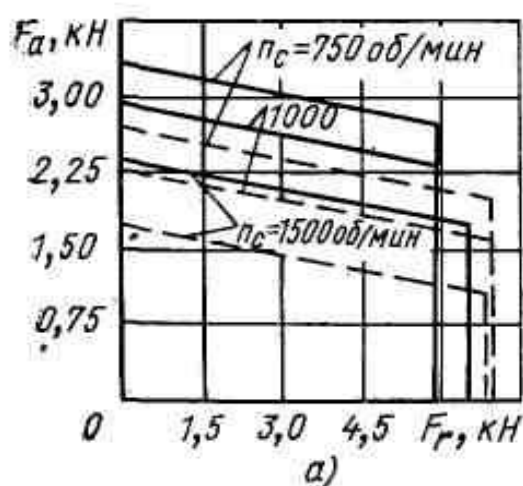


Рис. 4.30. То же, что и на рис. 4.28, с  $h=200$  мм.

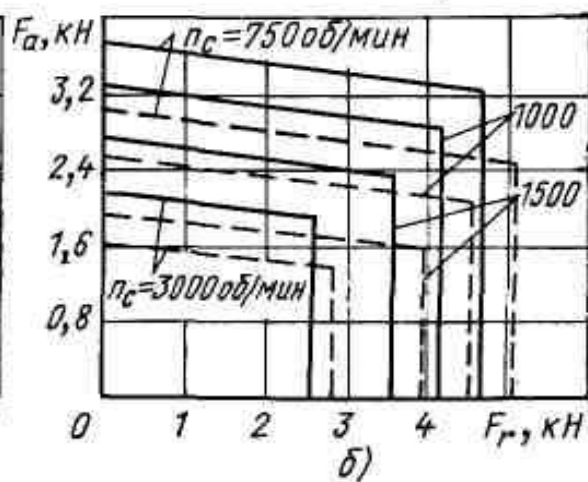
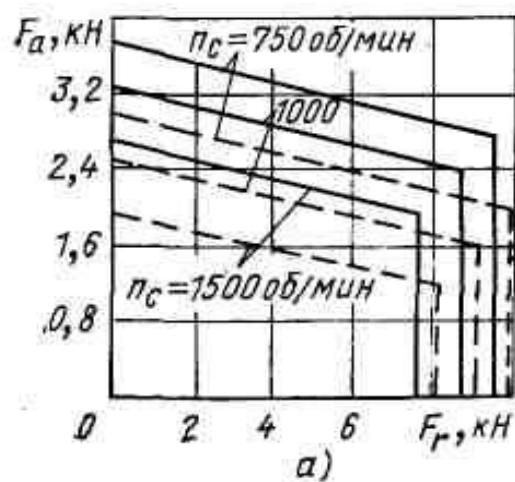


Рис. 4.31. То же, что и на рис. 4.28, с  $h=225$  мм.

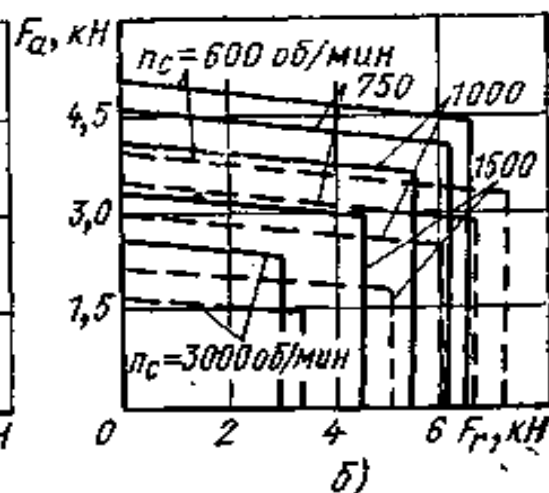
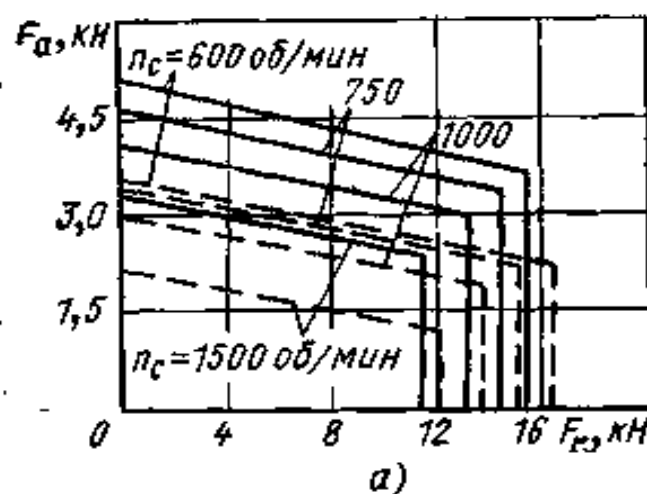


Рис. 4.32. То же, что и на рис. 4.28, с  $h=250$  мм.

Рис. 4.33.  $F_a=f(F_r)$  для двигателей с  $h=280$  мм и степенью защиты IP44.

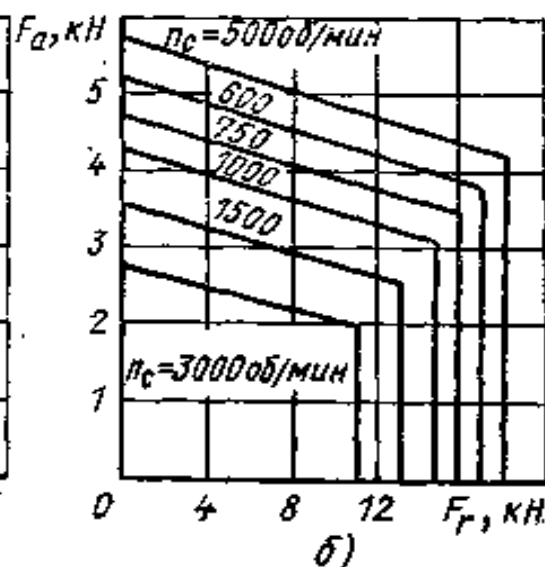
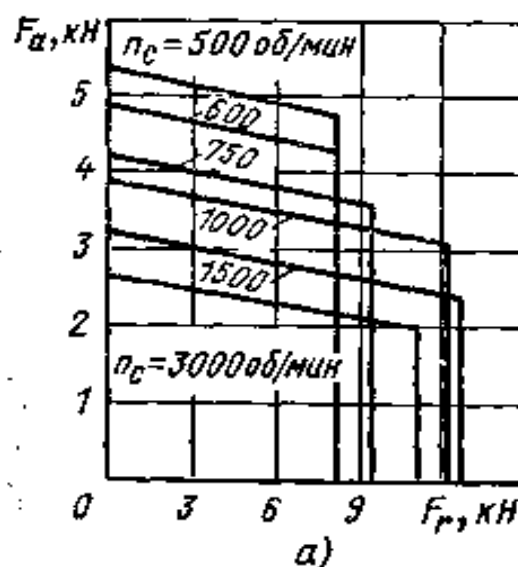
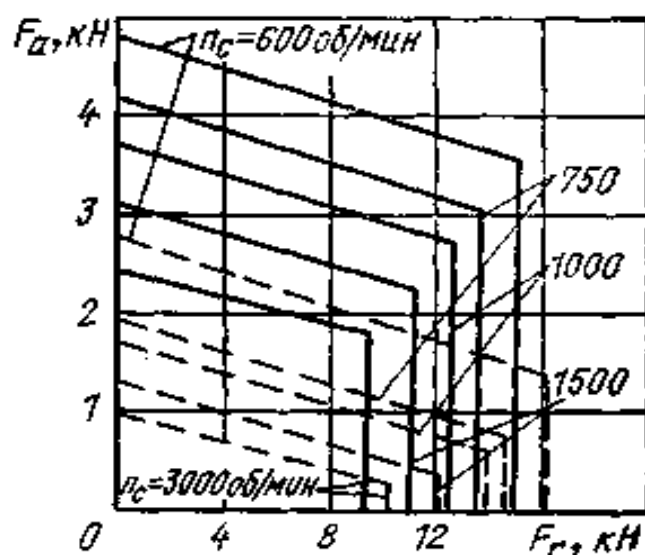


Рис. 4.34.  $F_a=f(F_r)$  для двигателей с  $h=315$  мм.  
а — со степенью защиты IP44; б — со степенью защиты IP23.

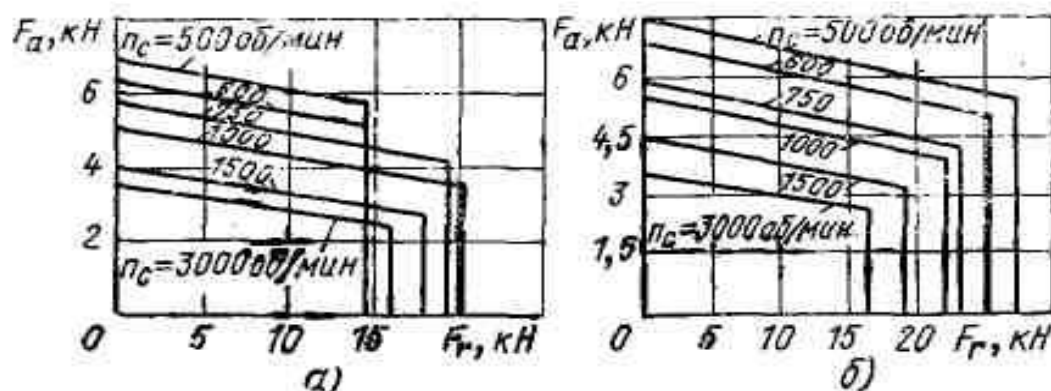


Рис. 4.35.  $F_a = f(F_r)$  для двигателей с  $h=355$  мм.  
 а — со степенью защиты IP44; б — со степенью защиты IP23.

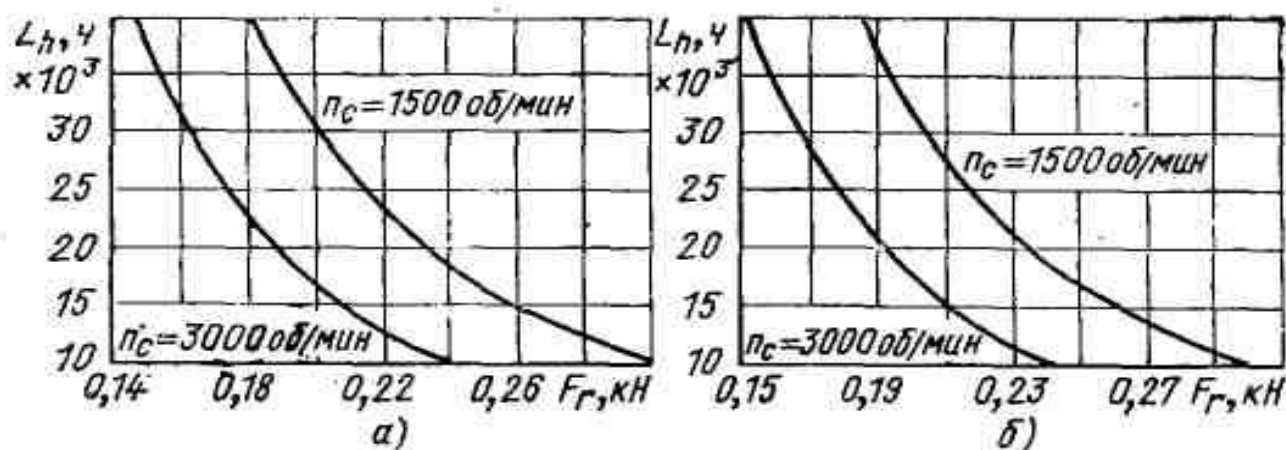


Рис. 4.36.  $L_h = f(F_r)$  для двигателей с  $h=50$  мм.  
 а — вал расположен горизонтально; б — вал расположен вертикально.

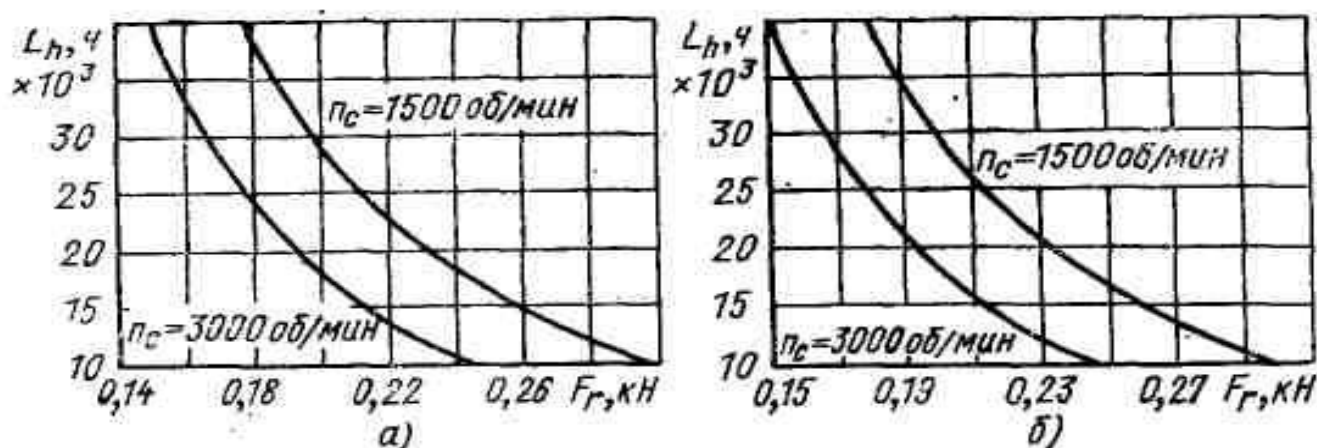


Рис. 4.37. То же, что и на рис. 4.36, с  $h=56$  мм.

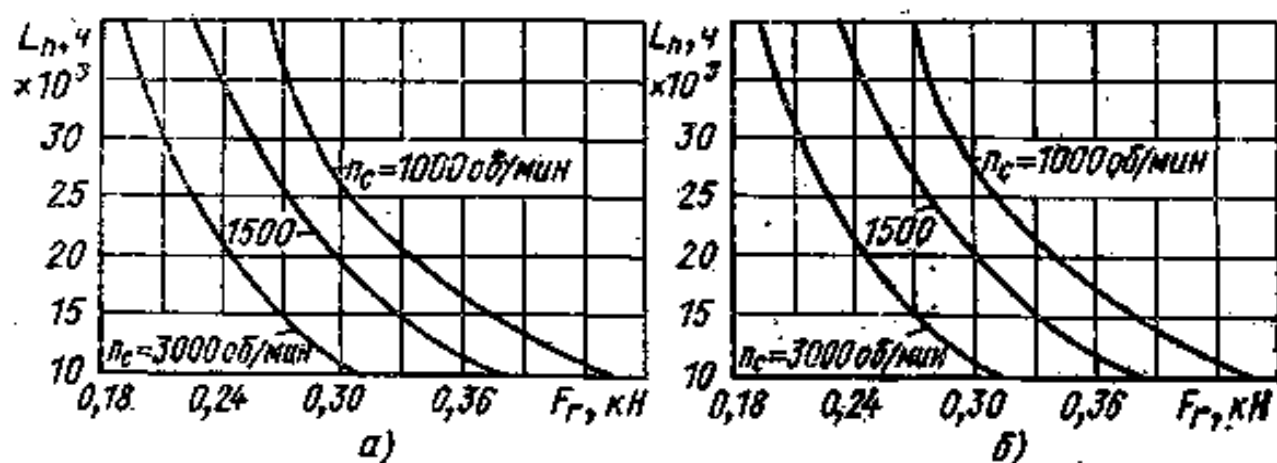


Рис. 4.38. То же, что и на рис. 4.36, с  $h=63 \text{ мм}$ .

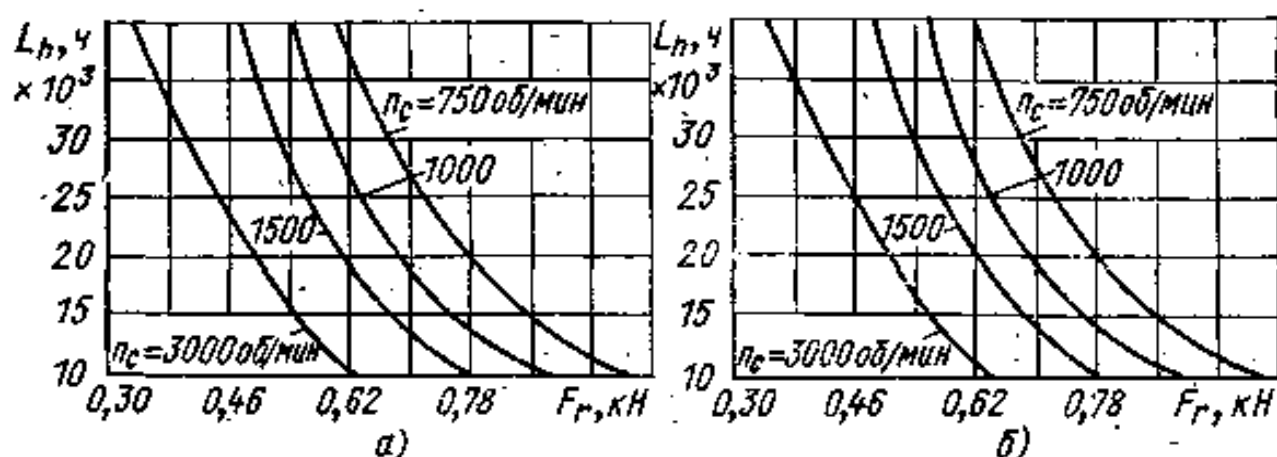


Рис. 4.39. То же, что и на рис. 4.36, с  $h=71 \text{ мм}$ .

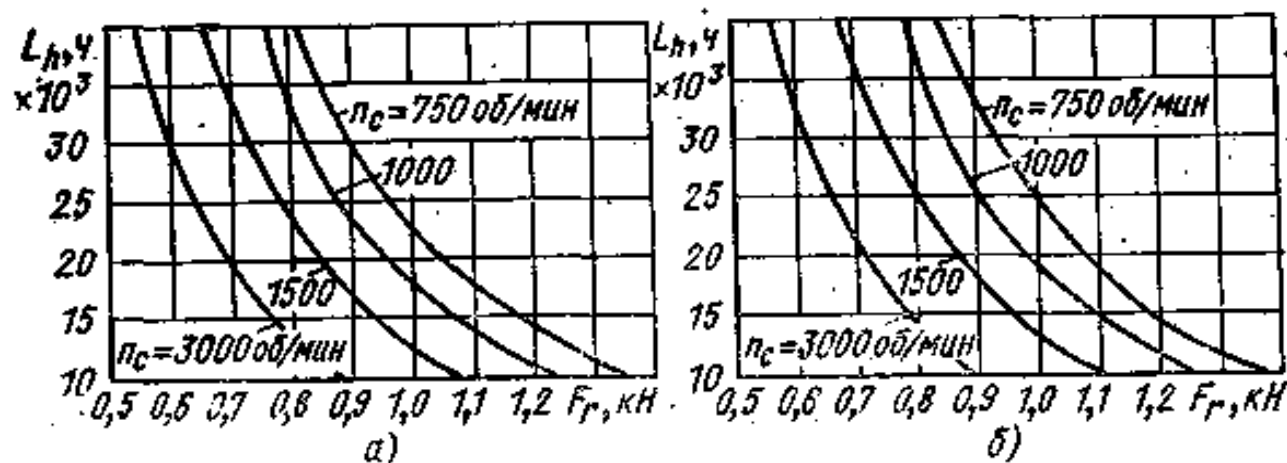


Рис. 4.40. То же, что и на рис. 4.36, с  $h=80 \text{ мм}$ .

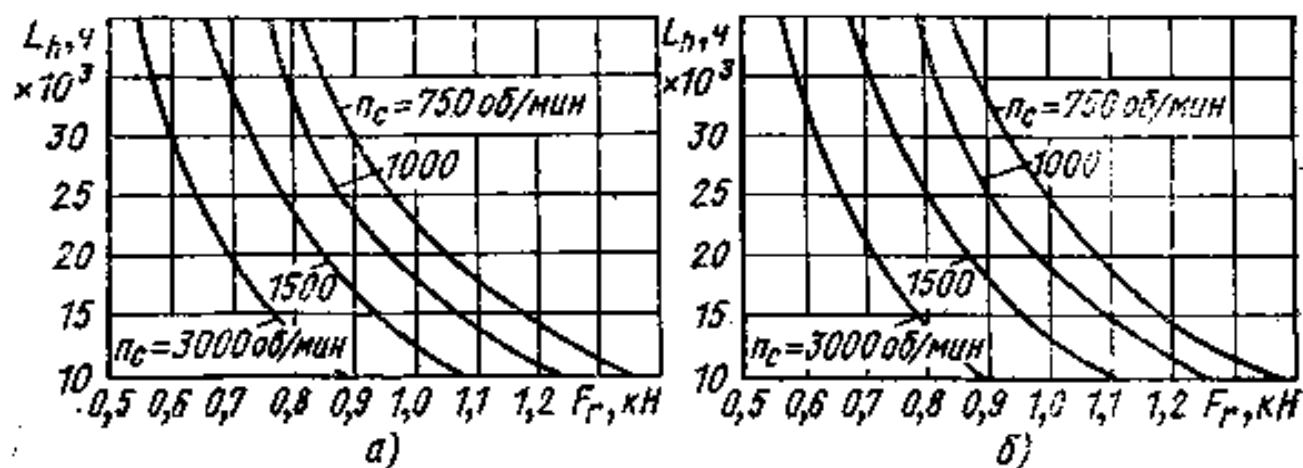


Рис. 4.41. То же, что и на рис. 4.36, с  $h=90 \text{ мм}$ .

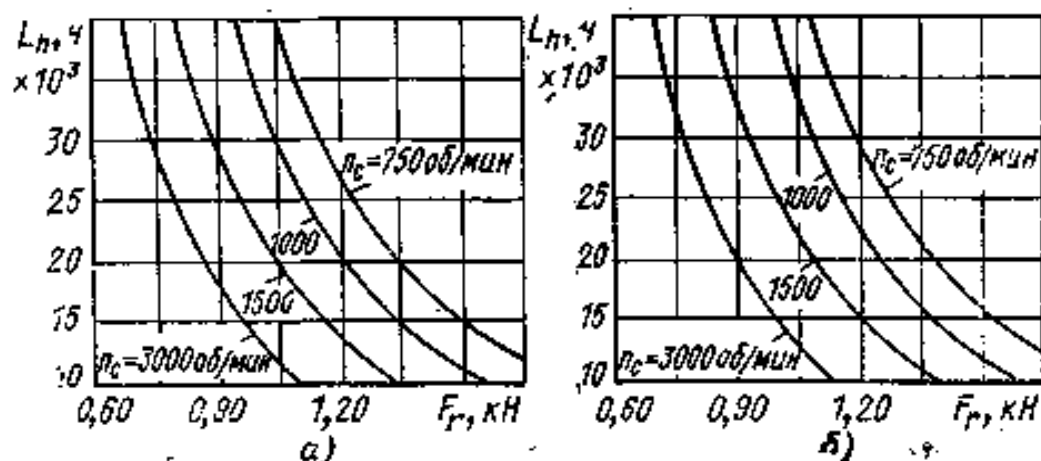


Рис. 4.42. То же, что и на рис. 4.36, с  $h=100 \text{ мм}$ .

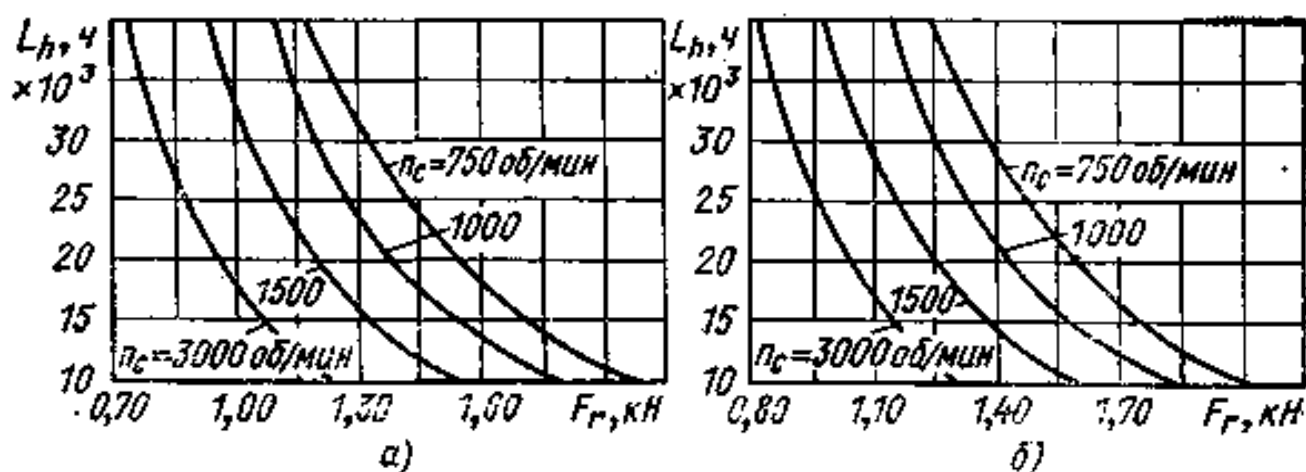


Рис. 4.43. То же, что и на рис. 4.36, с  $h=112 \text{ мм}$ .

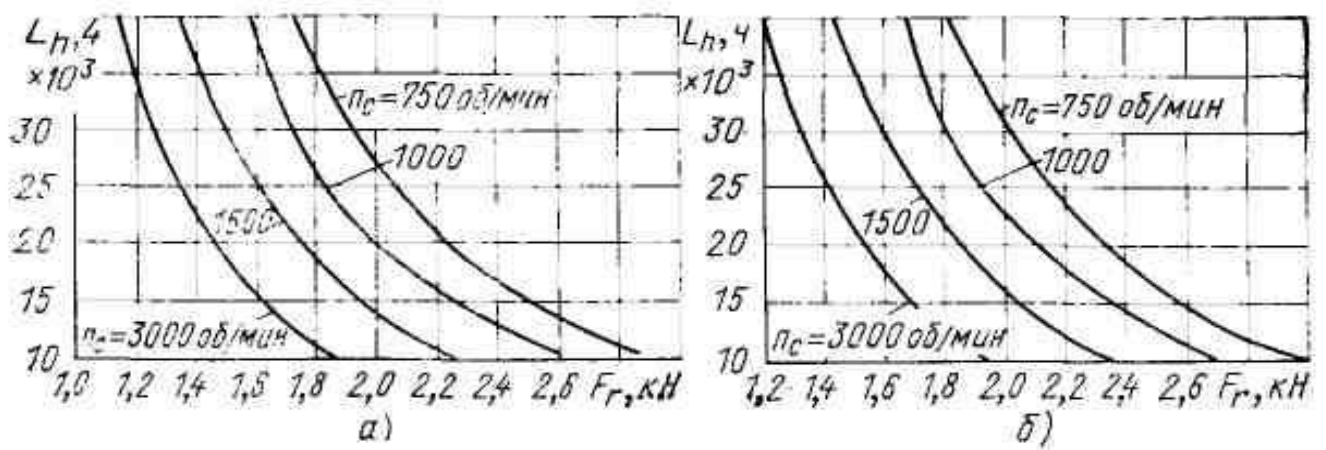


Рис. 4.44. То же, что и на рис. 4.36, с  $h=132$  мм.

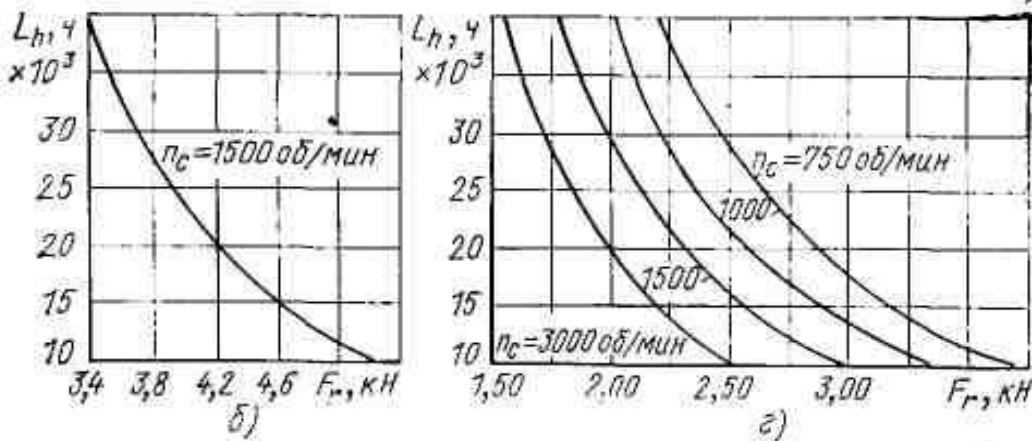
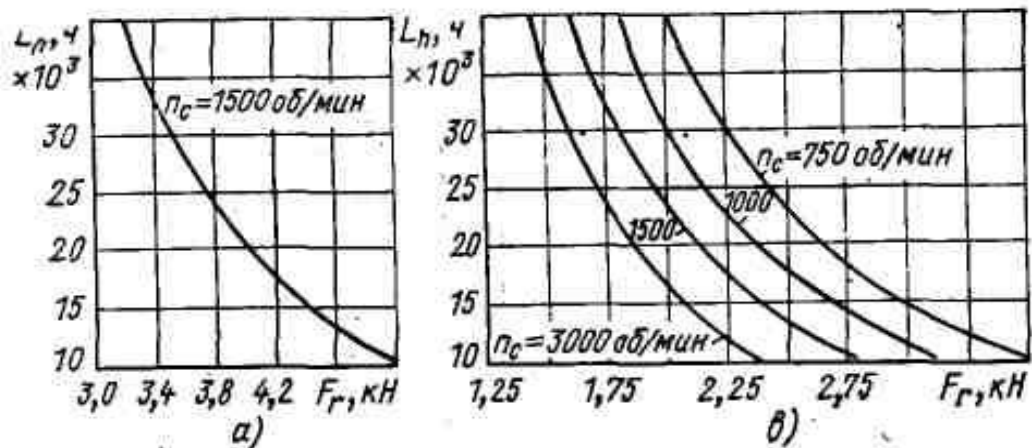


Рис. 4.45.  $L_h = f(F_r)$  для двигателей с  $h=160$  мм и степенью защиты IP44.

$a$  — вал расположен горизонтально, со стороны выступающего конца вала — роликоподшипник;  $б$  — вал расположен вертикально, со стороны выступающего конца вала — роликоподшипник;  $в$  — вал расположен горизонтально, со стороны выступающего конца вала — шарикоподшипник;  $г$  — вал расположен вертикально, со стороны выступающего конца вала — шарикоподшипник.

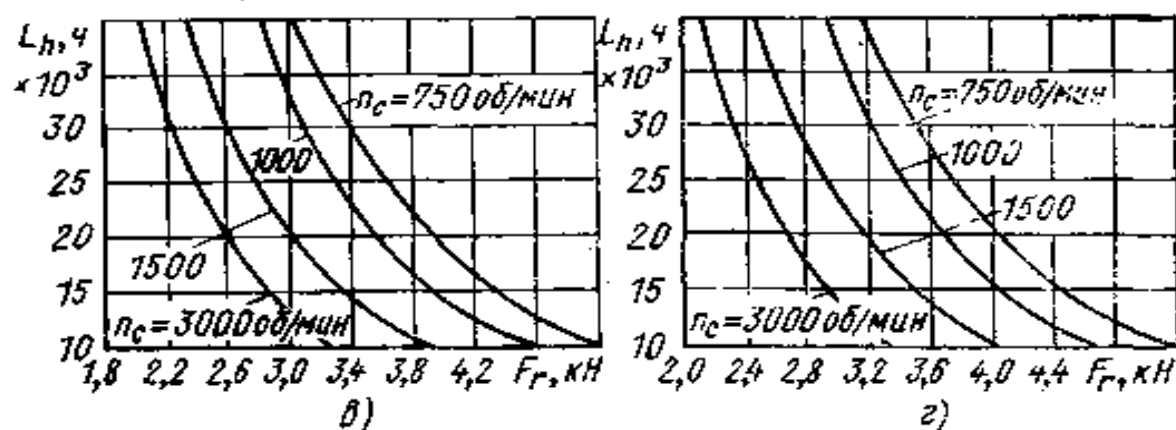
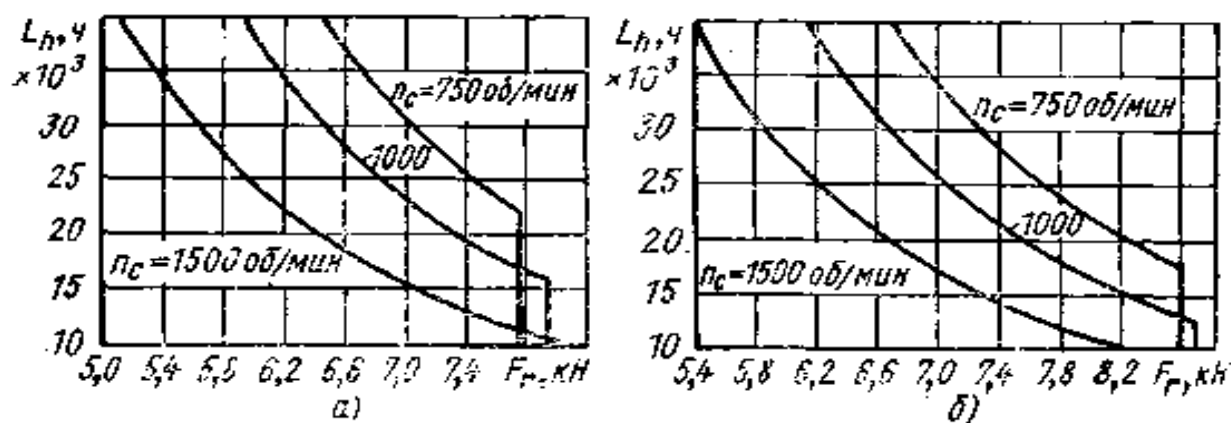


Рис. 4.46. То же, что и на рис. 4.45, с  $h=180 \text{ мм}$ .

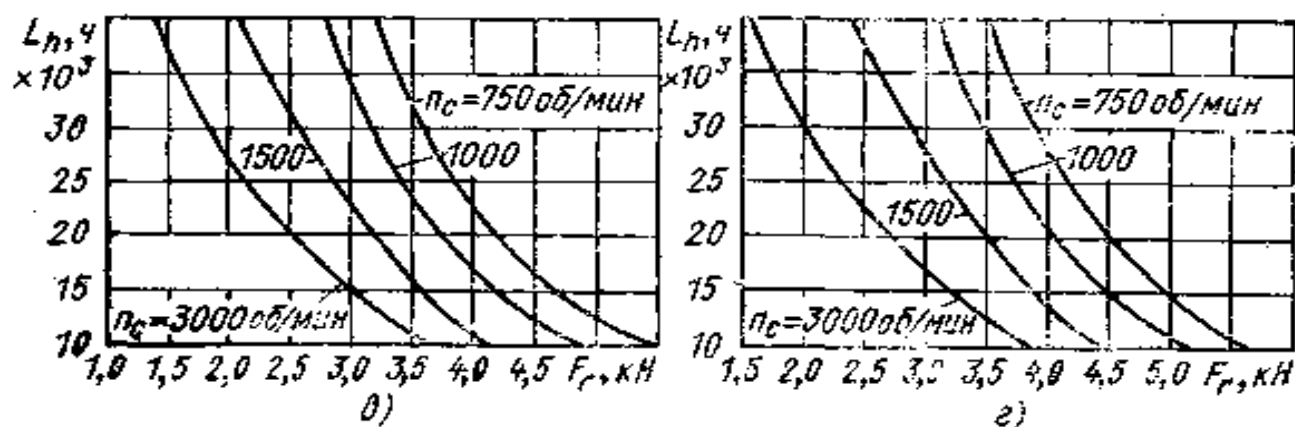
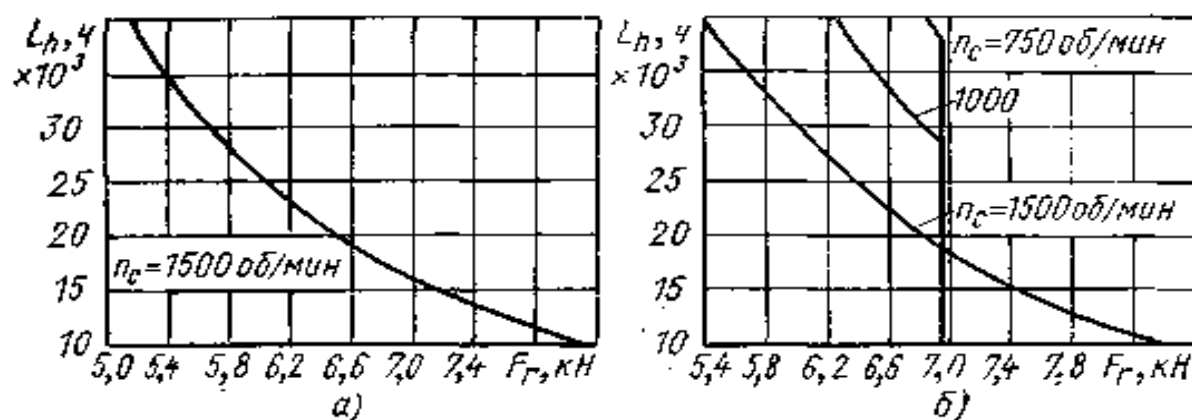


Рис. 4.47. То же, что и на рис. 4.45, с  $h=200 \text{ мм}$ .

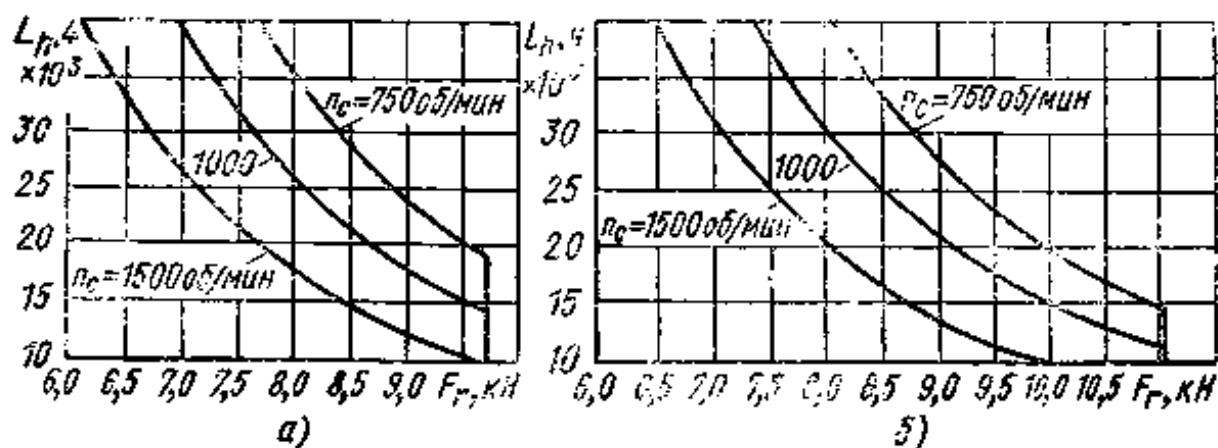


Рис. 4.48. То же, что и на рис. 4.45, с  $h=225$  мм.

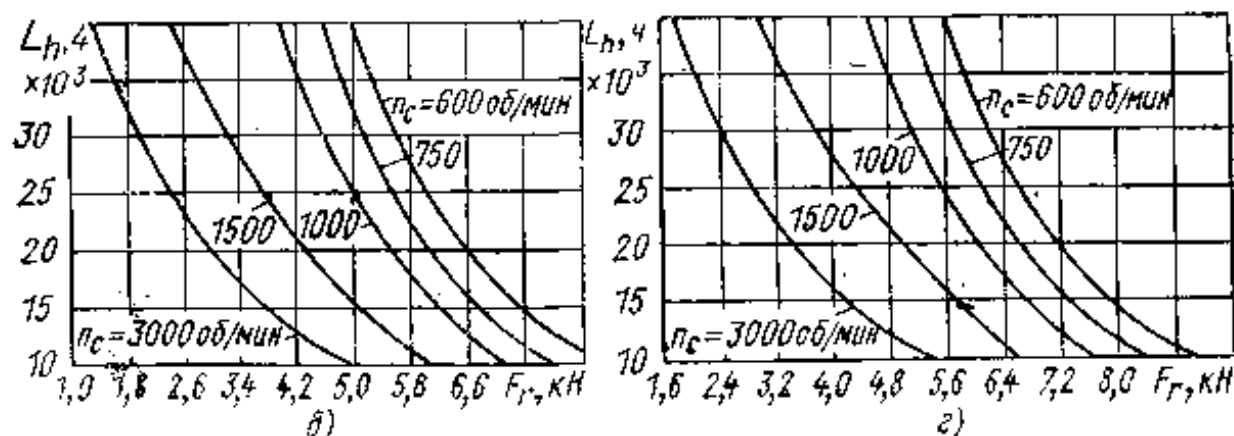
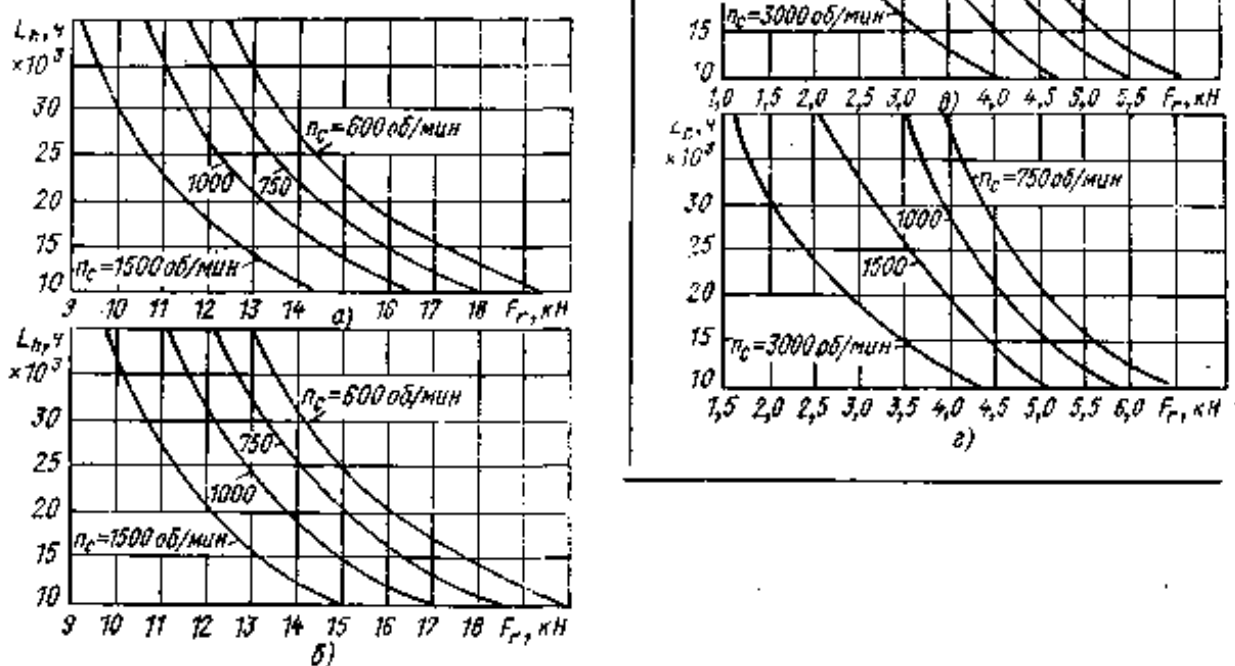


Рис. 4.49. То же, что и на рис. 4.45, с  $h=250$  мм.



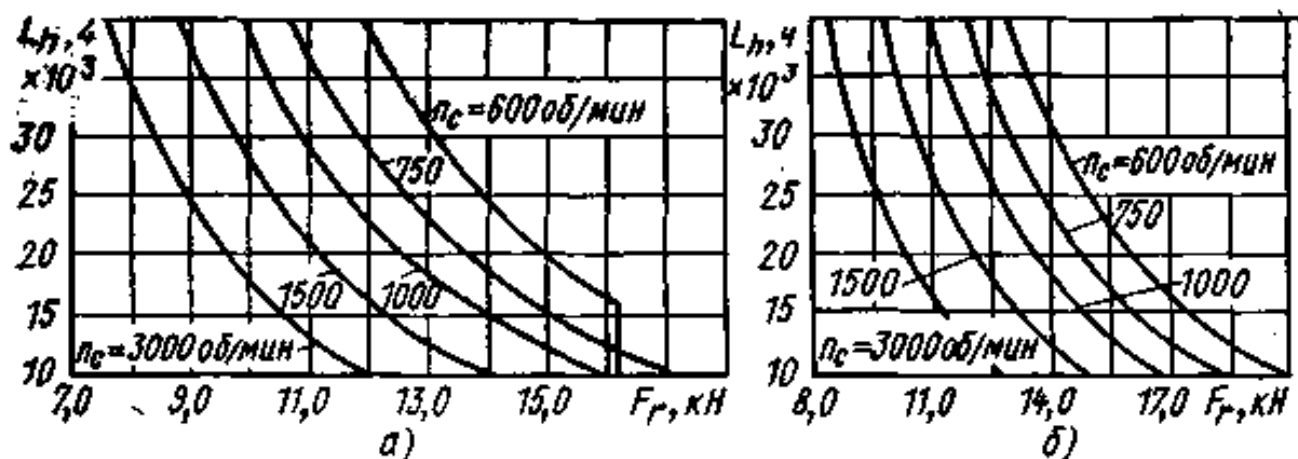


Рис. 4.50.  $L_h = f(F_r)$  для двигателей с  $h=280$  мм и степенью защиты IP44.

а — вал расположен горизонтально; б — вал расположен вертикально.

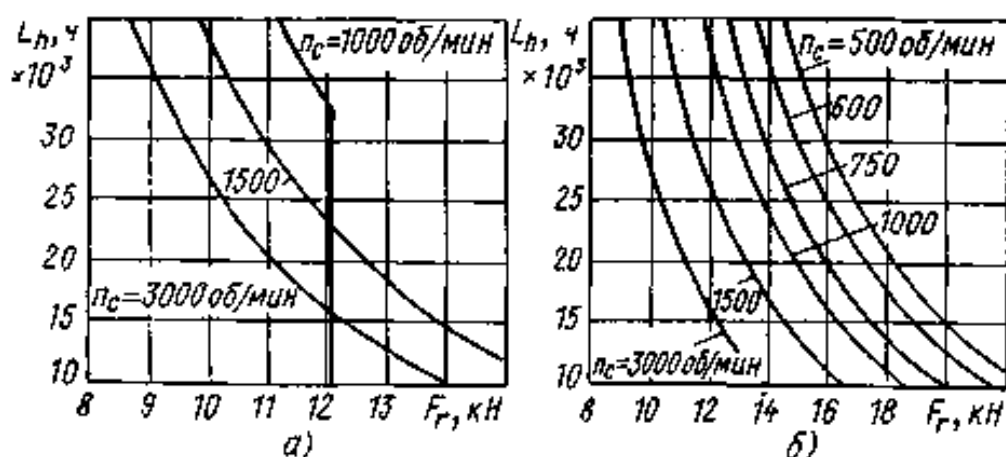


Рис. 4.51.  $L_h = f(F_r)$  для двигателей с  $h=315$  мм.

а — со степенью защиты IP44; б — со степенью защиты IP23.

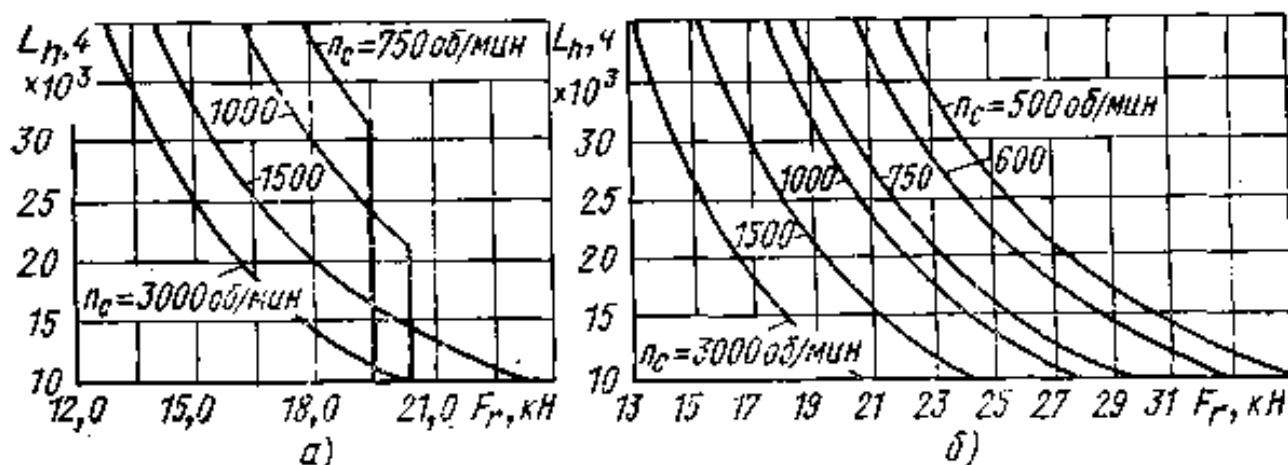
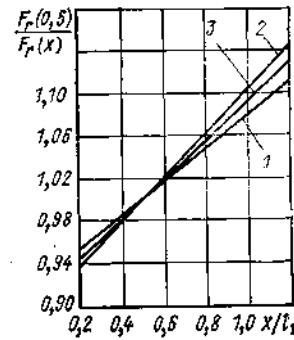


Рис. 4.52.  $L_h = f(F_r)$  для двигателей с  $h=355$  мм.

а — со степенью защиты IP44; б — со степенью защиты IP23.

Рис. 4.53. Зависимость  $F_{r(0,5)}/F_{r(x)}$  от  $x/l_1$ .

1 — для двигателей с  $h=50+63$  мм; 280+355 мм при  $n_c=3000$  об/мин; 2 — для двигателей с  $h=71+180$  мм; 200+225 мм при  $n_c \leq 1500$  об/мин; 3 — для двигателей с  $h=200+225$  мм при  $n_c=3000$  об/мин; 250 мм; 280+355 мм при  $n_c \leq 1500$  об/мин.



Для двигателей с высотами оси вращения 160—280 мм и степенью защиты IP23 можно пользоваться зависимостями  $L_h=f(F_r)$ , приведенными на рис. 4.45—4.50. Для двигателей, указанных в табл. 4.9, следует вводить поправку  $\Delta F_r$ .

На рис. 4.53 представлены зависимости  $F_{r(0,5)}/F_{r(x)}$  от  $x/l_1$ :  $F_{r(0,5)}$  — предельно допускаемая радиальная нагрузка, приложенная посередине выступающего конца вала при заданной долговечности подшипников;  $F_{r(x)}$  — предельно допускаемая радиальная нагрузка, приложенная к произвольной точке свободного конца вала при той же расчетной долговечности. Кривые рис. 4.53 позволяют быстро рассчитать  $F_{r(x)}$  по значению  $F_{r(0,5)}$ , найденному из рис. 4.36—4.52 при заданной долговечности подшипников.

**Пример 1.** Определить предельно допускаемую радиальную нагрузку посередине выступающего конца вала двигателя 4A180M6. Исполнение IM3011 (вал расположен вертикально). Необходимая расчетная долговечность подшипника 20 000 ч. По табл. 4.8 определяем, что в исполнении IM3011 в двигателе 4A180 со стороны выступающего конца вала установлен шарикоподшипник 312. Из рис. 4.46,г для 20 000 ч по кривой для  $n_c=1000$  об/мин находим  $F_r=3,70$  кН.

**Пример 2.** Для этого же двигателя определить предельно допускаемую аксиальную нагрузку при действии на выступающий конец вала радиальной нагрузки 3,70 кН. Из рис. 4.29,6 по кривой для  $n_c=1000$  об/мин (штриховой) находим  $F_a=1,90$  кН.

**Пример 3.** Определить для этого же двигателя предельно допускаемую радиальную нагрузку  $F_r$ , если она приложена к концу выступающего вала ( $x/l_1=1$ ). Из рис. 4.12,6 по штриховой кривой для  $n_c=1000$  об/мин находим предельно допускаемую нагрузку: при  $x=110$  мм  $F_r=3,35$  кН.

**Пример 4.** Определить для того же двигателя предельно допускаемую радиальную нагрузку  $F_r$ , приложенную к концу выступающего вала, при расчетной долговечности подшипников 30 000 ч. Из рис. 4.46,г находим при  $x/l_1=0,5$   $F_{r(0,5)}=3,20$  кН. Из рис. 4.53 находим по кривой 2 для  $x/l_1=1$   $F_{r(0,5)}/F_{r(1)}=1,106$

$$F_{r(1)} = \frac{F_{r(0,5)}}{F_{r(0,5)} \cdot F_{r(1)}} = \frac{3,2}{1,106} = 2,89 \text{ кН}$$

Более точно отношение  $F_{r(0,5)}/F_{r(x)}$  может быть найдено по графикам  $F_r=f(x)$ , приведенным на рис. 4.2—4.18.

Кривые, представленные на рис. 4.2—4.53 для двигателей основного исполнения, справедливы также для двигателей с повышенным пусковым моментом, с повышенным скольжением, малошумных, специализированных исполнений по условиям окружающей среды.