

## Оглавление

Введение.....	2
Домашнее контрольное задание .....	2
Технические данные асинхронных двигателей.....	4
Методика расчетов значений параметров и характеристик асинхронных двигателей по каталожным данным .....	11
Расчет активных и индуктивных сопротивлений схемы замещения АД (п. 1 задания) .....	11
Расчет значений характеристик АД для режима холостого хода ( $M=0$ ) при номинальных значениях напряжения питания $U_H$ и частоты изменения этого напряжения $f_H$ (п. 2 задания).....	13
Расчет значений характеристик АД для различных значений момента нагрузки $M$ и напряжения питания $U$ при номинальном значении частоты изменения напряжения $f_H$ (пп. 3 и 4 задания).....	16
Особенности расчета значений характеристик АД для различных значений частоты изменения напряжения питания $f$ при номинальных значениях напряжения $U_H$ и момента нагрузки $M_H$ (п. 5 задания) .....	17
Приложение к методике расчетов .....	18
Вывод формул для сопротивлений схемы замещения АД по каталожным данным .....	18
Обоснование необходимости введения поправочного коэффициента $K_{\Pi}$ для расчета значения тока холостого хода.....	21
Указания к построению графиков .....	22
Требования к отчету по домашнему заданию .....	22
Список рекомендуемой литературы.....	23

## Введение

Асинхронные двигатели (АД) как наиболее надежные и дешевые по сравнению с другими двигателями получили наибольшее распространение. В учебном процессе на лекциях, семинарах, лабораторных работах студенты изучают устройство, принцип действия, электромагнитные процессы, режимы работы, характеристики АД и не изучают вопросы расчета этих характеристик. Данная работа предназначена заполнить этот пробел.

**Цель домашнего задания** – ознакомление с методикой расчетов параметров схемы замещения и характеристик АД с короткозамкнутым и с фазным ротором, расчет параметров и характеристик АД, указанного в задании, в установившемся двигательном режиме. Исходными данными для расчетов являются каталожные (паспортные) данные АД, а также относительные значения момента нагрузки, напряжения питания и частоты изменения этого напряжения.

## Домашнее контрольное задание

Для АД с короткозамкнутым или с фазным ротором, каталожные данные которого приведены в табл. 1 и табл. 2, выполнить следующие расчеты и построения, используя приведенные ниже методику расчетов значений параметров и характеристик АД, указания к построению графиков, требования к отчету по заданию и компьютерную программу Mathcad или подобную. Задание выполнить в следующей последовательности:

1. Рассчитать значения активных и индуктивных сопротивлений схемы замещения АД.
2. Рассчитать значения характеристик АД для режима холостого хода при номинальных значениях напряжения питания  $U_H$  и частоты изменения этого напряжения  $f_H$ . Результаты расчетов записать в табл. 3.
3. Для различных значений момента нагрузки  $M$  при номинальных значениях напряжения питания  $U_H$  и частоты изменения этого напряжения  $f_H$  рассчитать значения характеристик АД: мощности на валу  $P_2$ , числа оборотов вала в минуту  $n$ , КПД  $\eta$ , коэффициента мощности  $\cos \varphi$ , потребляемых тока  $I_1$  и мощности  $P_1$ . Результаты расчетов записать в табл. 3. По этим результатам построить рабочие характеристики АД, т.е. графики зависимостей  $M(P_2)$ ,  $n(P_2)$ ,  $P_1(P_2)$ ,  $\eta(P_2)$ ,

## Оглавление

$\cos \varphi(P_2)$ ,  $I_1(P_2)$ , а также графики механической  $n(M)$  и электромеханической  $n(I_1)$  характеристик.

4. Для двух значений напряжения питания  $U$ , меньшего  $\alpha \cdot U_H$  и большего  $\beta \cdot U_H$ , чем номинальное значение  $U_H$ , при номинальном значении частоты  $f_H$  нужно рассчитать значения характеристик того же АД, нагруженного номинальным моментом  $M_H$ . Значения коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  указаны в табл. 4. Результаты расчетов записать в табл. 5.
5. Для двух значений частоты изменения напряжения питания  $f$ , меньшего  $\gamma \cdot f_H$  и большего  $\rho \cdot f_H$ , чем номинальное значение  $f_H$ , при номинальном значении напряжения  $U_H$  нужно рассчитать значения характеристик того же АД, нагруженного номинальным моментом  $M_H$ . Значения коэффициентов  $\gamma$  и  $\rho$  указаны в табл. 4. Результаты расчетов записать в табл. 6.
6. Оформить отчет по выполненному домашнему заданию в соответствии с приведенными ниже требованиями к этому отчету.

## Технические данные асинхронных двигателей

Технические данные двигателей серии АИР с короткозамкнутым ротором.

$$U_H = 380 / 220 \text{ В}$$

Таблица 1

Вар	Тип двигателя	Мощность, кВт	При номинальной нагрузке			$\frac{M_{\Pi}}{M_H}$	$\frac{M_m}{M_H}$	$\frac{M_{\min}}{M_H}$	$\frac{I_{\Pi}}{I_H}$
			Скольжение, %	КПД, %	$\cos \varphi$				
Синхронная частота вращения 3000 об/мин									
1	АИР71А2	0,75	6	78,5	0,83	2,1	2,2	1,6	6
2	АИР71В2	1,1	6,5	79	0,83	2,1	2,2	1,6	6
3	АИР80А2	1,5	5	81	0,85	2,1	2,2	1,6	7
4	АИР80В2	2,2	5	83	0,87	2	2,2	1,6	7
5	АИР90L2	3	5	84,5	0,87	2	2,2	1,6	7
6	АИР100S2	4	5	87	0,88	2	2,2	1,6	7,5
7	АИР100L2	5,5	5	88	0,89	2	2,2	1,6	7,5
8	АИР112M2	7,5	3,5	87,5	0,88	2	2,2	1,6	7,5
	АИРХ112M2			87,5	0,88	2	2,2	1,6	7,5
9	АИР132M2	11	3	88	0,89	1,6	2,2	1,2	7,5
	АИРХ132M2			88	0,89	1,6	2,2	1,2	7,5
10	АИР160S2	15	3	89	0,88	1,8	2,7	1,7	7
	АИРХ160S2			89	0,88	1,8	2,7	1,7	7
11	АИР160M2	18,5	3	89,5	0,9	1,8	2,7	1,7	7
	АИРХ160M2			89,5	0,9	1,8	2,7	1,7	7
12	АИР180S2	22	2,7	89,5	0,88	1,7	2,7	1,6	7
13	АИР180M2	30	2,5	90,5	0,88	1,7	2,7	1,6	7,5
Синхронная частота вращения 1500 об/мин									
14	АИР71А4	0,55	9,5	70,5	0,7	2,3	2,2	1,8	5
15	АИР71В4	0,75	10	73	0,73	2,2	2,2	1,6	5
16	АИР80А4	1,1	7	75	0,81	2,2	2,2	1,6	5,5
17	АИР80В4	1,5	7	78	0,83	2,2	2,2	1,6	5,5
18	АИР90L4	2,2	7	81	0,83	2,10	2,2	1,6	6,5
19	АИР100S4	3	6	82	0,83	2	2,2	1,6	7
20	АИР100L4	4	6	85	0,84	2	2,2	1,6	7

### [Оглавление](#)

Вар	Тип двигателя	Мощность, кВт	При номинальной нагрузке			$\frac{M_{\Pi}}{M_{H}}$	$\frac{M_{m}}{M_{H}}$	$\frac{M_{\min}}{M_{H}}$	$\frac{I_{\Pi}}{I_{H}}$
			Скольжение, %	КПД, %	$\cos \varphi$				
21	АИР112М4	5,5	4,5	87,5	0,88	2	2,2	1,6	7
	АИРХ112М4		4,5	87,5	0,88	2	2,2	1,6	7
22	АИР132S4	7,5	4	87,5	0,86	2	2,2	1,6	7,5
	АИРХ132S4		4	87,5	0,86	2	2,2	1,6	7,5
23	АИР132М4	11	3,5	87,5	0,87	2	2,2	1,6	7,5
	АИРХ132М4		3,5	87,5	0,87	2	2,2	1,6	7,5
24	АИР160S4	15	3	89,5	0,89	1,9	2,9	1,8	7
	АИРХ160S4		3	89,5	0,89	1,9	2,9	1,8	7
25	АИР160М4	18,5	3	90	0,89	1,9	2,9	1,8	7
	АИРХ160М4		3	90	0,89	1,9	2,9	1,8	7
26	АИР180S4	22	2,5	90	0,87	1,5	2,4	1,3	6,5
27	АИР180М4	30	2	91,5	0,86	1,7	2,7	1,6	7
Синхронная частота вращения 1000 об/мин									
28	АИР71А6	0,37	8,5	65	0,66	2	2,2	1,6	4,5
29	АИР71В6	0,55	8,5	68,5	0,7	2	2,2	1,6	4,5
30	АИР80А6	0,75	8	70	0,72	2	2,2	1,6	4,5
31	АИР80В6	1,1	8	74	0,74	2	2,2	1,6	4,5
32	АИР90L6	1,5	7,5	76	0,72	2	2,2	1,6	6
33	АИР100L6	2,2	5,5	81	0,74	2	2,2	1,6	6
34	АИР112МА6	3	5	81	0,76	2	2,2	1,6	6
	АИРХ112МА6	3	5	81	0,76	2	2,2	1,6	6
35	АИР112МВ6	4	5	82	0,81	2	2,2	1,6	6
	АИРХ112МВ6	4	5	82	0,81	2	2,2	1,6	6
36	АИР132S6	5,5	4	85	0,8	2	2,2	1,6	7
	АИРХ132S6	5,5	4	85	0,8	2	2,2	1,6	7
37	АИР132М6	7,5	4	85	0,81	2	2,2	1,6	7
	АИРХ132М6	7,5	4	85	0,81	2	2,2	1,6	7
38	АИР160S6	11	3	87	0,84	1,7	2,5	1,6	6,5
	АИРХ160S6	11	3	87	0,84	1,7	2,5	1,6	6,5

[Оглавление](#)

Вар	Тип двигателя	Мощность, кВт	При номинальной нагрузке			$\frac{M_{\Pi}}{M_{H}}$	$\frac{M_{m}}{M_{H}}$	$\frac{M_{\min}}{M_{H}}$	$\frac{I_{\Pi}}{I_{H}}$
			Скольжение, %	КПД, %	$\cos \varphi$				
39	АИР160М6	15	3	88	0,85	1,7	2,6	1,6	6,5
	АИРХ160М6	15	3	88	0,85	1,7	2,6	1,6	6,5
40	АИР180М6	18,5	2	88	0,85	1,6	2,4	1,5	6,5
Синхронная частота вращения 750 об/мин									
41	АИР132S8	4	4,5	83	0,7	1,8	2,2	1,4	6
	АИРХ132S8		4,5	83	0,7	1,8	2,2	1,4	6
42	АИР132М8	5,5	5	83	0,74	1,8	2,2	1,4	6
	АИРХ132М8		5	83	0,74	1,8	2,2	1,4	6
43	АИР160S8	7,5	3	87	0,75	1,6	2,4	1,4	5,5
	АИРХ160S8		3	87	0,75	1,6	2,4	1,4	5,5
44	АИР160М8	11	3	87,5	0,75	1,6	2,4	1,4	6
	АИРХ160М8		3	87,5	0,75	1,6	2,4	1,4	6
45	АИР180М8	15	2,5	89	0,82	1,6	2,2	1,5	5,5

Технические данные двигателей серии 4А с фазным ротором.

$$U_{H} = 380 / 220 \text{ В}$$

Таблица 2

Вар	Тип двигателя	Мощность кВт	КПД %	$\cos \varphi$	Скольжение, %	$\frac{M_{m}}{M_{H}}$	Ток ротора $I_{2H}$ , А	Напряжение ротора $U_{2H}$ , В
Синхронная частота вращения 1500 об/мин ( $n_0$ )								
1	4АК160S4У3	11	86,5	0,86	5	3	22	305
2	4АК160М4У3	14	88,5	0,87	4	3,5	29	300
3	4АК180М4У3	18	89	0,88	3,5	4	38	295
4	4АК200М4У3	22	90	0,87	2,5	4	45	340
5	4АК200L4У3	30	90,5	0,87	2,5	4	55	350
6	4АК225М4У3	37	90	0,87	3,5	3	160	160
7	4АК250SA4У3	45	91	0,88	3	3	170	230
8	4АК250SB4У3	55	90,5	0,9	3	3	170	200
9	4АК250М4У3	71	91,5	0,86	2,5	3	170	250
Синхронная частота вращения 1000 об/мин								
10	4АК160S6У3	7,5	82,5	0,77	5	3,5	18	300
11	4АК160М6У3	10	84,5	0,76	4,5	3,8	20	310

[Оглавление](#)

Вар	Тип двигателя	Мощность кВт	КПД %	$\cos \varphi$	Скольжение, %	$\frac{M_m}{M_H}$	Ток ротора $I_{2H}$ , А	Напряжение ротора $U_{2H}$ , В
12	4АК180М6У3	13	85,5	0,8	4,5	4	25	325
13	4АК200М6У3	18,5	88	0,81	3,5	3,5	35	360
14	4АК200Л6У3	22	88	0,8	3,5	3,5	45	330
15	4АК225М6У3	30	89	0,85	3,5	2,5	150	140
16	4АК250С6У3	37	89	0,84	3,5	2,5	165	150
17	4АК250М6У3	45	90,5	0,87	3	2,5	160	180
Синхронная частота вращения 750 об/мин								
18	4АК160С8У3	5,5	80	0,7	6,5	2,5	14	300
19	4АК160М8У3	7,5	82	0,7	6	3	16	290
20	4АК180М8У3	11	85,5	0,72	4	3,5	25	270
21	4АК200М8У3	15	86	0,7	3,5	3	28	360
22	4АК200Л8У3	18,5	86	0,73	3,5	3	40	300
23	4АК225М8У3	22	87	0,82	4,5	2,2	140	102
24	4АК250С8У3	30	88,5	0,81	4	2,2	155	125
25	4АК250М8У3	37	89	0,8	3,5	2,2	155	148
Синхронная частота вращения 1500 об/мин								
26	4АНК160С4У3	14	86,5	0,85	5	3	27	330
27	4АНК160М4У3	17	88	0,87	5	3,5	34	315
28	4АНК180С4У3	22	87	0,86	5,5	3,2	43	300
29	4АНК180М4У3	30	88	0,81	4,5	3,2	63	290
30	4АНК200М4У3	37	90	0,88	3	3	62	360
31	4АНК200Л4У3	45	90	0,88	3,5	3	75	375
32	4АНК225М4У3	55	89,5	0,87	4	2,5	200	170
33	4АНК250СА4У3	75	90	0,88	4,5	2,3	250	180
34	4АНК250СВ4У3	90	91,5	0,87	4	2,5	260	220
35	4АНК250М4У3	110	92	0,9	3,5	2,5	260	250
36	4АНК280С4У3	132	92	0,88	2,9	2	330	251
37	4АНК280М4У3	160	92,5	0,88	2,6	2	330	300
38	4АНК315С4У3	200	93	0,89	2,5	2	396	312
39	4АНК315М4У3	250	93	0,9	2,5	2	425	360
40	4АНК355С4У3	315	93,5	0,9	2,2	2	460	420
41	4АНК355М4У3	400	94	0,9	2	2	485	505
Синхронная частота вращения 1000 об/мин								
42	4АНК180С6У3	13	83,5	0,81	7	3	42	205
43	4АНК180М6У3	17	85	0,82	6	3	32,5	335
44	4АНК200М6У3	22	88	0,81	3,5	3	37	380
45	4АНК200Л6У3	30	88,5	0,82	4	3	46	375
46	4АНК225М6У3	37	89	0,86	4	1,9	180	140
47	4АНК250СА6У3	45	89,5	0,86	4	2,3	200	155
48	4АНК250СВ6У3	55	91	0,88	3,5	2,5	185	190
49	4АНК250М6У3	75	91,5	0,85	3	2,5	200	250
50	4АНК280С6У3	90	90	0,88	3,6	1,9	277	202
51	4АНК280М6У3	110	91,5	0,87	3,6	1,9	297	230
52	4АНК315С6У3	132	92	0,88	3	1,9	320	257

[Оглавление](#)

Вар	Тип двигателя	Мощность кВт	КПД %	$\cos \varphi$	Скольжение, %	$\frac{M_m}{M_H}$	Ток ротора $I_{2H}$ , А	Напряжение ротора $U_{2H}$ , В
53	4АНК315М6У3	160	92,5	0,88	3	1,9	352	291
54	4АНК355S6У3	200	93	0,89	2,5	1,8	411	304
55	4АНК355М6У3	250	93	0,89	2,5	1,8	401	380
Синхронная частота вращения 750 об/мин								
56	4АНК180S8У3	11	85	0,72	5	3,2	22,5	315
57	4АНК180М8У3	14	86,5	0,69	4,5	3,5	28	310
58	4АНК200М8У3	18,5	86	0,78	4,5	2,5	30	380
59	4АНК200L8У3	22	87	0,79	4,5	2,5	40	330
60	4АНК225М8У3	30	86,5	0,8	5	1,8	165	120
61	4АНК250SA8У3	37	87,5	0,8	5,5	2,2	190	115
62	4АНК250SB8У3	45	89	0,82	4	2,2	190	140
63	4АНК250М8У3	55	89,5	0,83	3,5	2,2	185	190
64	4АНК280S8У3	75	90,5	0,84	4	1,9	257	190
65	4АНК280М8У3	90	90,5	0,84	4	1,9	267	214
66	4АНК315S8У3	110	91,5	0,84	3,5	1,9	311	225
67	4АНК315М8У3	132	92	0,84	3,5	1,9	364	247
68	4АНК355S8У3	160	92,5	0,86	2,7	1,7	353	285
69	4АНК355М8У3	200	92,5	0,86	2,7	1,7	359	350

Технические данные асинхронных двигателей взяты из «Справочника по электрическим машинам» автора Кацмана М. М., изданного в 2005 г.



Результаты расчетов значений характеристик АД для различных значений момента нагрузки  $M$  при номинальных значениях напряжения питания  $U_H$  и частоты изменения этого напряжения  $f_H$

Таблица 3

$M, H \cdot m$	Значения характеристик АД					
	$n, \text{об/мин}$	$P_2, \text{кВт}$	$P_1, \text{кВт}$	$\eta$	$\cos \varphi$	$I_1, \text{А}$
0		0		0		
$0,25 \cdot M_H =$						
$0,5 \cdot M_H =$						
$0,75 \cdot M_H =$						
$M_H =$						
$1,25 \cdot M_H =$						
$1,5 \cdot M_H =$						
$M_H =$	0	0		0		

Дополнительные исходные данные для расчетов по п. 4 и п. 5 задания

Таблица 4

Вариант	Значения коэффициентов			
	$\alpha = U_{\min} / U_H$	$\beta = U_{\max} / U_H$	$\gamma = f_{\min} / f_H$	$\rho = f_{\max} / f_H$
а	0.8	1.1	0.9	1.1
б	0.8	1.1	0.93	1.07
в	0.85	1.1	0.95	1.05
г	0.85	1.1	0.96	1.04
д	0.9	1.1	0.94	1.06
е	0.9	1.1	0.92	1.08

Примечание. Если не был указан вариант а, б, в, г, д или е, то следует брать вариант а.

Результаты расчетов значений характеристик АД для различных значений напряжения питания  $U$  при номинальных значениях частоты изменения этого напряжения  $f_H$  и момента нагрузки  $M_H$

Таблица 5

$U, \text{ В}$	Значения характеристик АД						
	$M, \text{ Н} \cdot \text{ м}$	$n, \text{ об/мин}$	$P_2, \text{ кВт}$	$P_1, \text{ кВт}$	$\eta$	$\cos \varphi$	$I_1, \text{ А}$
$U_{\min} =$							
$U_H =$							
$U_{\max} =$							

Результаты расчетов значений характеристик АД для различных значений частоты изменения напряжения питания  $f$  при номинальных значениях этого напряжения  $U_H$  и момента нагрузки  $M_H$

Таблица 6

$f, \text{ Гц}$	Значения характеристик АД						
	$M, \text{ Н} \cdot \text{ м}$	$n, \text{ об/мин}$	$P_2, \text{ кВт}$	$P_1, \text{ кВт}$	$\eta$	$\cos \varphi$	$I_1, \text{ А}$
$f_{\min} =$							
$f_H = 50$							
$f_{\max} =$							

## Методика расчетов значений параметров и характеристик асинхронных двигателей по каталожным данным

В каталогах и табл. 1 и табл. 2 указаны номинальные значения напряжения питания  $U_H$  и основных характеристик АД: мощности  $P_{2H}$ , синхронной частоты вращения  $n_0$ , т.е. числа оборотов в минуту вращающегося магнитного поля статора, скольжения  $s_H$ , коэффициента мощности  $\cos \varphi_H$ , КПД  $\eta_H$ , отношения  $\lambda$  максимального вращающего момента на валу  $M_m$  к номинальному  $M_H$ , а для АД с короткозамкнутым ротором – также отношений пускового момента к номинальному  $M_{II}/M_H$  и пускового тока к номинальному  $I_{II}/I_H$ .

Значения параметров и характеристик АД нужно рассчитывать как показано ниже.

### Расчет активных и индуктивных сопротивлений схемы замещения АД (п. 1 задания)

Активные и индуктивные сопротивления, значения которых нужно рассчитать, показаны на рис.1, где изображена упрощенная Г-образная схема замещения одной фазы АД. Согласно [1] «параметры асинхронных машин таковы, что переход от Г-образной схемы к упрощенной Г-образной схеме не приводит к появлению заметных погрешностей».

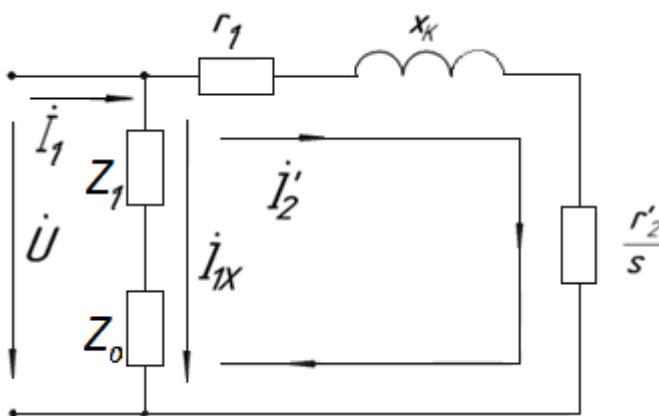


Рис. 1

Здесь:

$Z_1$  и  $r_1$  – комплексное и активное сопротивления обмотки статора,

$r_2'$  – активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора,

$x_k$  – индуктивное сопротивление обмоток для режима короткого замыкания (при неподвижном роторе),

$Z_0$  – комплексное сопротивление поперечной ветви для Т-образной схемы замещения АД,

$s$  – скольжение ротора,

$\dot{U}$  – напряжение питания,

$\dot{I}_{1X}$  – ток холостого хода,

$\dot{I}_2'$  – ток в обмотке ротора, приведенный к обмотке статора,

$\dot{I}_1$  – потребляемый ток.

Согласно [2]:  $Z_1 + Z_0 = C_1 \cdot Z_0$ , где  $C_1 = 1 + Z_1/Z_0 = 1,02 \div 1,06$ .

Значения сопротивлений  $r_1$ ,  $r_2'$  и  $x_k$  нужно рассчитывать в следующей последовательности.

$$\xi = M_{\text{ЭМН}}/M_H = 1,02 \div 1,10,$$

Рекомендуется принимать  $\xi = 1,05$ .

где  $M_{\text{ЭМН}}$  и  $M_H$  – номинальные электромагнитный и вращающий моменты.

$$a = \frac{r_1}{r_2'} = \frac{\alpha_0}{\xi} \cdot \frac{1 - \eta_H}{\eta_H} \cdot \frac{1 - s_H}{s_H} - 1$$

Эта формула получена в Приложении к методике расчетов.  $\alpha_0 = 0,58 \div 0,67$ .

Рекомендуется принимать  $\alpha_0 = 0,61$ . Ожидаемые значения отношения  $a = r_1/r_2'$  – от десятых долей единицы до нескольких единиц.

$$R_m = \frac{3 \cdot U_H^2 \cdot (1 - s_H)}{2 \cdot P_{2H} \cdot (\lambda + \xi - 1)}, \quad G = \frac{1}{s_H^2} + \frac{2 \cdot a}{s_H} + a^2, \quad b = \frac{\lambda + \xi - 1}{\xi},$$

## Оглавление

$$r_2' = \frac{R_m}{G} \cdot \left[ \frac{b}{s_H} + a + \sqrt{\left( \frac{b}{s_H} + a \right)^2 - G} \right]$$

или сразу:

$$r_2' = \frac{3 \cdot U_H^2}{2 \cdot P_{2H}} \cdot \frac{s_H \cdot (1 - s_H) \cdot \left[ b + a \cdot s_H + \sqrt{b^2 - 1 + 2 \cdot a \cdot s_H \cdot (b - 1)} \right]}{(\lambda + \xi - 1) \cdot (1 + 2 \cdot a \cdot s_H + a^2 \cdot s_H^2)},$$

$$r_1 = a \cdot r_2', \quad x_K = \sqrt{\left[ \frac{3 \cdot U_H^2 \cdot (1 - s_H)}{2 \cdot P_{2H} \cdot (\lambda + \xi - 1)} - r_1 \right]^2} - r_1^2 = \sqrt{R_m^2 - 2 \cdot R_m \cdot r_1}.$$

Формулы для  $r_2'$  и  $x_K$  также получены в Приложении к методике расчетов.

Здесь и ниже в формулах мощности  $P_2$  и  $P_1$  нужно употреблять в Ваттах (Вт).

При  $U_H = 380/220$  В фазное напряжение  $U_H = 220$  В, а  $3 \cdot U_H^2/2 = 72600$  В<sup>2</sup>.

Рассчитанные значения сопротивлений  $r_1$ ,  $r_2'$  и  $x_K$  нужно проверить по формулам, полученным, исходя из выражений для номинального и максимального электромагнитных моментов (см. Приложение):

$$P_{2H} = \frac{3 \cdot U_H^2 \cdot (1 - s_H) \cdot r_2' / s_H}{\xi \cdot \left[ (r_1 + r_2' / s_H)^2 + x_K^2 \right]}, \quad \lambda = \frac{3 \cdot U_H^2}{2 \cdot P_{2H}} \cdot \frac{1 - s_H}{r_1 + \sqrt{r_1^2 + x_K^2}} + 1 - \xi.$$

Сопротивление  $Z_0$  нужно определять после расчета значений тока холостого хода АД  $I_{1X}$  и разности фаз  $\varphi_X$  этого тока и напряжения питания.

### **Расчет значений характеристик АД для режима холостого хода (M=0) при номинальных значениях напряжения питания $U_H$ и частоты изменения этого напряжения $f_H$ (п. 2 задания)**

Необходимые расчетные формулы для тока холостого хода  $I_{1X} = I_0$  и угла  $\varphi_X$  между векторами  $\dot{U}_H$  и  $\dot{I}_{1X}$  можно получить, используя векторную АД диаграмму для номинального режима работы АД, изображенную на рис. 2.

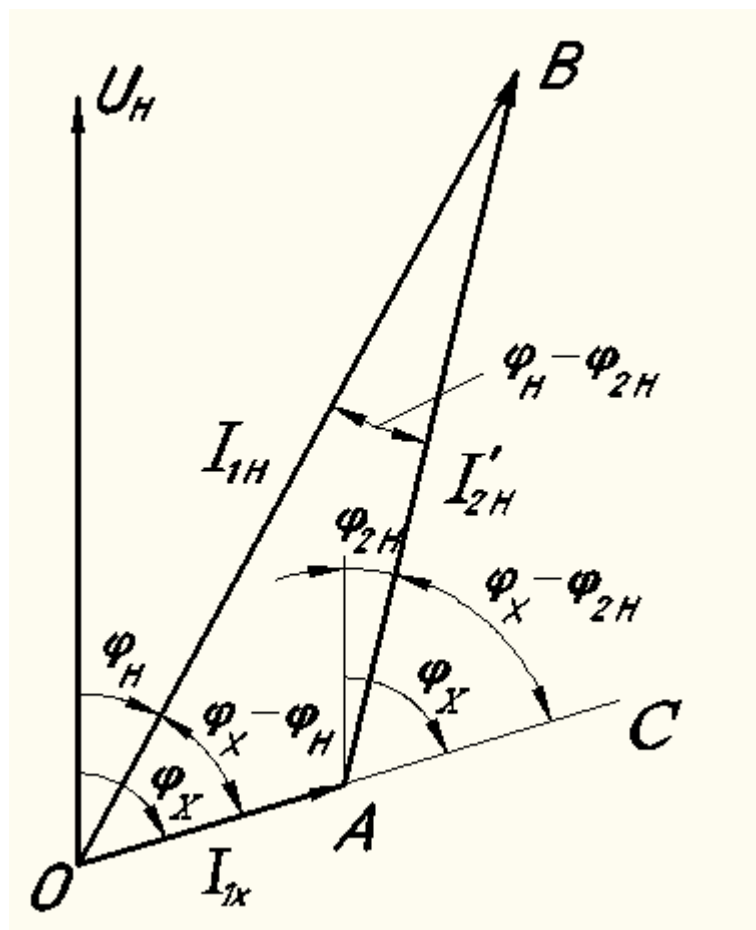


Рис. 2

Угол ОВА между векторами  $\dot{I}_{1H}$  и  $\dot{I}'_{2H}$  равен  $\varphi_H - \varphi_{2H}$ , потому что сумма этого угла с другим острым углом треугольника ВОА равна внешнему углу ВАС с величиной  $\varphi_X - \varphi_{2H}$ .

Значения тока  $I_{1X} = I_0$  и угла  $\varphi_X$  нужно рассчитывать в следующей последовательности.

Потребляемые мощность и фазный ток:

$$P_{1H} = P_{2H} / \eta_H, \quad I_{1H} = P_{1H} / (3 \cdot U_H \cdot \cos \varphi_H).$$

Ток в обмотке ротора, приведенный к обмотке статора:

$$\dot{i}'_{2H} = \frac{U_H}{\sqrt{(r_1 + r'_2 / s_H)^2 + x_k^2}}$$

Угол между векторами тока  $\dot{I}_{1H}$  и напряжения  $\dot{U}_H$ :

$$\varphi_H = \arccos(\cos \varphi_H)$$

[Оглавление](#)

Угол между векторами тока  $\dot{I}'_{2H}$  и напряжения  $\dot{U}_H$ :

$$\varphi_{2H} = \arctg\left(\frac{x_K}{r_1 + r'_2 / s_H}\right)$$

Ток  $I_{1X} = I_0$  нужно рассчитывать по теореме косинуса для треугольника ОВА (см. рис. 2):

$$I_{1X} = I_0 = \sqrt{I_{1H}^2 + I_{2H}'^2 - 2 \cdot I_{1H} \cdot I_{2H}' \cdot \cos(\varphi_H - \varphi_{2H})},$$

$$\cos \varphi_X = (I_{1H} \cdot \cos \varphi_H - I_{2H}' \cdot \cos \varphi_{2H}) / I_{1X}, \quad (\text{см. рис. 2})$$

$$\varphi_X = \arccos(\cos \varphi_X)$$

Значение угла  $\varphi_X$  практически не зависит, а тока  $I_{1X}$  зависит от значений напряжения  $U$  и частоты его изменения  $f$ .

Для напряжения  $U$  и частоты  $f$ , отличных от номинальных  $U_H$  и  $f_H$ , ток  $I_{1X}$  не равен  $I_0$  и его нужно определять по формуле:

$$I_{1X} = K_{II} \cdot I_0 \cdot \frac{U}{U_H} \cdot \frac{f_H}{f},$$

где  $K_{II}$  – поправочный коэффициент, зависящий от отношений напряжений  $U/U_H$  и частот  $f/f_H$ .

В табл. 7 приведены значения коэффициента  $K_{II}$ .

Таблица 7

$\frac{U}{U_H} \cdot \frac{f_H}{f}$	0.8	0.85	0.9	0.95	1.0	1.05	1.1
$K_{II}$	0.76	0.82	0.88	0.94	1.0	1.07	1.15

В Приложении к методике расчетов обоснована необходимость введения коэффициента  $K_{II}$  для расчета значения тока холостого хода  $I_{1X}$ .

Потребляемая мощность:

### [Оглавление](#)

$$P_{1X} = 3 \cdot U_H \cdot I_{1X} \cdot \cos \varphi_X$$

Скорость вращения вала при холостом ходе АД  $n_X$  очень близка к скорости вращения магнитного поля статора  $n_0$ , но меньше  $n_0$  из-за магнитных и механических потерь в АД.

$$n_X \approx (0,995 \dots 0,997) \cdot n_0$$

Результаты расчета характеристик нужно записать в табл. 3

Сопротивление  $Z_0$  схемы замещения АД (см. рис. 1) нужно определять по формулам:

$$z_0 = |Z_0| = \sqrt{r_0^2 + x_0^2} = \frac{U_H}{C_1 \cdot I_0},$$

$$r_0 = z_0 \cdot \cos \varphi_X, \quad x_0 = z_0 \cdot \sin \varphi_X, \quad Z_0 = r_0 + j \cdot x_0$$

### Расчет значений характеристик АД для различных значений момента нагрузки $M$ и напряжения питания $U$ при номинальном значении частоты изменения напряжения $f_H$ (пп. 3 и 4 задания)

Значения характеристик АД нужно рассчитывать в следующей последовательности:

$$\Omega_0 = n_0 / 9,55, \quad n_H = n_0 \cdot (1 - s_H), \quad M_H = 9,55 \cdot P_{2H} / n_H, \quad M_0 = (\xi - 1) \cdot M_H,$$

где  $n_0$  и  $\Omega_0$  – синхронная частота вращения (об/мин) и соответствующая угловая частота,

$n_H$  – номинальное число оборотов в минуту вала двигателя,

$M_0$  – момент холостого хода.

$$\text{Для п. 3 задания нужно принять:} \quad U = U_H, \quad M = \mu \cdot M_H,$$

где  $\mu = 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25; 1,5$ .

Для п. 4 задания нужно принять  $M = M_H$  и два значения напряжения питания:

$$U = U_{\min} = \alpha \cdot U_H \quad \text{и} \quad U = U_{\max} = \beta \cdot U_H,$$

Значения коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  указаны в табл. 4.

Для пп. 3 и 4 нужно выполнить следующие действия:

$$R_S = \frac{3 \cdot U^2}{2 \cdot (M + M_0) \cdot \Omega_0} - r_1, \quad s = \frac{r_2'}{R_S + \sqrt{R_S^2 - (r_1^2 + x_K^2)'}}$$

### [Оглавление](#)



Выражения для  $R_s$  и  $s$  получены из известной формулы для электромагнитного момента:

$$M_{\text{эм}} = \frac{3 \cdot U^2 \cdot r_2' / s}{\Omega_0 \cdot [(r_1 + r_2' / s)^2 + x_K^2]} = M + M_0,$$

$$I_2' = \frac{U}{\sqrt{(r_1 + r_2' / s)^2 + x_K^2}}, \quad \varphi_2 = \arctg\left(\frac{x_K}{r_1 + r_2' / s}\right),$$

$$I_{1X} = K_{\Pi} \cdot I_0 \cdot U / U_H, \quad I_1 = \sqrt{I_{1X}^2 + I_2'^2 + 2 \cdot I_{1X} \cdot I_2' \cdot \cos(\varphi_X - \varphi_2)},$$

$$\cos \varphi = (I_{1X} \cdot \cos \varphi_X + I_2' \cdot \cos \varphi_2) / I_1.$$

Формулы для тока  $I_1$  и  $\cos \varphi$  получены из рассмотрения векторной диаграммы на рис. 2 для ненормального режима работы АД.

$$n = n_0 \cdot (1 - s), \quad P_2 = M \cdot n / 9,55,$$

$$P_1 = 3 \cdot U \cdot I_1 \cdot \cos \varphi, \quad \eta = P_2 / P_1.$$

Для п. 3 нужно дополнительно рассчитать значения пусковых характеристик АД при  $n = 0$ : момента  $M = M_{\Pi} \approx M_{\text{эмП}}$ , потребляемого тока  $I_1 = I_{\text{П}}$ , а также отношений  $M_{\Pi} / M_H$ ,  $I_{\text{П}} / I_{\text{Н}}$ . При этом в формулах для момента  $M_{\text{эм}} \approx M_{\text{эмП}}$ , тока  $I_2'$  и угла  $\varphi_2$  нужно считать  $s = 1$ .

Результаты расчета характеристик по п. 3 нужно записать в табл. 3, а по п. 4 – в табл. 5.

### **Особенности расчета значений характеристик АД для различных значений частоты изменения напряжения питания $f$ при номинальных значениях напряжения $U_H$ и момента нагрузки $M_H$ (п. 5 задания)**

Значения характеристик АД нужно рассчитывать в следующей последовательности.

Надо принять  $U = U_H$ ,  $M = M_H$  и два значения частоты  $f$ :

$$f = f_{\min} = \gamma \cdot f_H, \quad f = f_{\max} = \rho \cdot f_H$$

Значения коэффициентов  $\gamma$  и  $\rho$  указаны в табл. 4.

$$\text{Для } f_{\min}: \Omega_{0\gamma} = \Omega_0 \cdot \gamma; \quad x_{K\gamma} = x_K \cdot \gamma, \quad n_{0\gamma} = n_0 \cdot \gamma$$

$$\text{Для } f_{\max}: \Omega_{0\rho} = \Omega_0 \cdot \rho; \quad x_{K\rho} = x_K \cdot \rho, \quad n_{0\rho} = n_0 \cdot \rho$$

Значения тока  $I_{1X}$  нужно рассчитывать по формуле:  $I_{1X} = K_{\Pi} \cdot I_0 \cdot f_H / f$ .

### [Оглавление](#)

Значения сопротивления  $R_s$ , скольжения  $s$ , тока  $I'_2$ , угла  $\varphi_2$ , числа оборотов  $n$  нужно рассчитывать по уточненным формулам для пп. 3 и 4 задания, в которых должны быть употреблены угловая скорость  $\Omega_{0\gamma}$  или  $\Omega_{0\rho}$  вместо  $\Omega_0$ , индуктивное сопротивление  $x_{k\gamma}$  или  $x_{k\rho}$  вместо  $x_k$ , число оборотов  $n_{0\gamma}$  или  $n_{0\rho}$  вместо  $n$ . Значения тока  $I_1$ , полезной  $P_2$  и потребляемой  $P_1$  мощностей, КПД  $\eta$  нужно рассчитывать по формулам для пп. 3 и 4 задания.

Результаты расчетов характеристик нужно записать в табл. 6.

## Приложение к методике расчетов

### Вывод формул для сопротивлений схемы замещения АД по каталожным данным

Для номинального режима работы, т.е. для  $U = U_H$ ,  $f = f_H$ ,  $M = M_H$ , известны формулы для следующих характеристик АД.

Число оборотов вала двигателя:

$$n_H = n_0 \cdot (1 - s_H).$$

Угловые скорости вращения вала  $\Omega_H$  и магнитного поля статора  $\Omega_0$ :

$$\Omega_H = n_H / 9,55 = \Omega_0 \cdot (1 - s_H), \quad \Omega_0 = n_0 / 9,55$$

Вращающий момент на валу:  $M_H = P_{2H} / \Omega_H$

Обозначим  $\Delta P_{\text{Мех}}$  – мощность механических потерь,  $\Delta P_{\text{Д}}$  – мощность добавочных потерь, обусловленных наличием высших гармоник МДС обмоток и зубчатым строением статора и ротора,  $M_0$  – момент холостого хода АД.

Электромагнитный момент:

$$M_{\text{ЭМН}} = M_H + M_0 = \xi \cdot M_H,$$

где  $M_0 = \frac{\Delta P_{\text{Мех}} + \Delta P_{\text{Д}}}{\Omega_H} = (\xi - 1) \cdot M_H, \quad \xi = 1 + (\Delta P_{\text{Мех}} + \Delta P_{\text{Д}}) / P_{2H},$

так как  $M_{\text{ЭМН}} \cdot \Omega_H = M_H \cdot \Omega_H + \Delta P_{\text{Мех}} + \Delta P_{\text{Д}}$

### [Оглавление](#)

Согласно [2] сумму мощностей потерь  $\Delta P_{\text{МЕХ}} + \Delta P_{\text{Д}}$  можно принять равной  $(0,02 \div 0,10) \cdot P_{2\text{H}}$ . Следовательно:  $\xi = 1,02 \div 1,1$ . Рекомендуется принимать  $\xi = 1,05$ .

Известно условие работы АД с максимально возможным КПД [2]:

$$\frac{P_2}{P_{2\text{H}}} = \beta_0 = \sqrt{\frac{\Delta P_0}{\Delta P_{\text{ЭЛН}}}} = 0,70 \div 0,85,$$

где  $\beta_0$  – коэффициент загрузки АД, для которого КПД  $\eta$  – максимальный,

$\Delta P_0$  – суммарная мощность магнитных и механических потерь.

Обычно мощность  $\Delta P_0$  приближенно считают не зависимой от режима работы АД [2].

$\Delta P_{\text{ЭЛН}} = 3 \cdot I_{2\text{H}}'^2 \cdot (r_1 + r_2')$  – мощность электрических потерь для номинального режима работы АД.

Мощность всех потерь в АД для номинального режима работы:

$$\Delta P_{\text{Н}} = \Delta P_0 + \Delta P_{\text{ЭЛН}} = P_{2\text{H}} \cdot \frac{1 - \eta_{\text{Н}}}{\eta_{\text{Н}}} = (1 + \beta_0^2) \cdot \Delta P_{\text{ЭЛН}},$$

Следовательно: 
$$\Delta P_{\text{ЭЛН}} = 3 \cdot I_{2\text{H}}'^2 \cdot (r_1 + r_2') = \frac{P_{2\text{H}}}{1 + \beta_0^2} \cdot \frac{1 - \eta_{\text{Н}}}{\eta_{\text{Н}}}.$$

Мощность электрических потерь в обмотке ротора для номинального режима работы АД:

$$\Delta P_{\text{ЭЛ2Н}} = 3 \cdot I_{2\text{H}}'^2 \cdot r_2' = M_{\text{ЭМН}} \cdot \Omega_0 \cdot s_{\text{Н}} = \xi \cdot M_{\text{Н}} \cdot \frac{\Omega_{\text{Н}}}{1 - s_{\text{Н}}} \cdot s_{\text{Н}} = \xi \cdot P_{2\text{H}} \cdot \frac{s_{\text{Н}}}{1 - s_{\text{Н}}}.$$

Рассматривая совместно два последних выражения для  $\Delta P_{\text{ЭЛН}}$  и  $\Delta P_{\text{ЭЛ2Н}}$ , исключив из них ток  $I_2'$ , получим формулу для отношения активных сопротивлений обмоток АД:

$$a = \frac{r_1}{r_2'} = \frac{\alpha_0}{\xi} \cdot \frac{1 - \eta_{\text{Н}}}{\eta_{\text{Н}}} \cdot \frac{1 - s_{\text{Н}}}{s_{\text{Н}}} - 1,$$

где  $\alpha_0 = \frac{1}{1 + \beta_0^2}$ . Обычно  $\beta_0 = 0,70 \div 0,85$ , тогда  $\alpha_0 = 0,67 \div 0,58$ .

Рекомендуется принимать:  $\beta_0 = 0,8$ , тогда  $\alpha_0 = 0,61$ .

Как показала практика расчетов, отношение  $a = r_1 / r_2'$  может принимать значение от десятых долей единицы до нескольких единиц.

Известно выражение для максимального электромагнитного момента АД:

### [Оглавление](#)

$$M_{\text{ЭММ}} = \frac{3 \cdot U_H^2}{2 \cdot \Omega_0 \cdot (r_1 + \sqrt{r_1^2 + x_K^2})} = \lambda \cdot M_H + M_0 = (\lambda + \xi - 1) \cdot M_H,$$

где  $\lambda = M_m / M_H$ .

Из выражения для момента  $M_{\text{ЭММ}}$  получим формулу для индуктивного сопротивления  $x_K$ :

$$x_K = \sqrt{\left[ \frac{3 \cdot U_H^2 \cdot (1 - s_H)}{2 \cdot P_{2H} \cdot (\lambda + \xi - 1)} - r_1 \right]^2 - r_1^2} = \sqrt{R_m^2 - 2 \cdot R_m \cdot r_1},$$

где  $R_m = \frac{3 \cdot U_H^2}{2 \cdot P_{2H}} \cdot \frac{1 - s_H}{\lambda + \xi - 1}$

Известно выражение для номинального электромагнитного момента АД:

$$M_{\text{ЭМН}} = \frac{3 \cdot U_H^2 \cdot r_2' / s_H}{\Omega_0 \cdot [(r_1 + r_2' / s_H)^2 + x_K^2]} = \xi \cdot M_H$$

Из этого выражения с учетом формулы  $r_1 = a \cdot r_2'$  и формулы для  $x_K$  получим квадратное уравнение с неизвестным сопротивлением  $r_2'$ :

$$(a \cdot r_2' + r_2' / s_H)^2 + R_m^2 - 2 \cdot a \cdot R_m \cdot r_2' = 2 \cdot b \cdot R_m \cdot r_2' / s_H,$$

где  $b = (\lambda + \xi - 1) / \xi$ .

Его решением является выражение:

$$r_2' = \frac{R_m}{G} \cdot \left[ \frac{b}{s_H} + a + \sqrt{\left( \frac{b}{s_H} + a \right)^2 - G} \right],$$

где  $G = 1 / s_H^2 + 2 \cdot a / s_H + a^2$

Если подставить выражения для  $G$  и  $R_m$  в формулу для  $r_2'$ , то получим формулу, позволяющую определить значение сопротивления  $r_2'$  за одно действие:

$$r_2' = \frac{3 \cdot U_H^2 \cdot s_H \cdot (1 - s_H) \cdot \left[ b + a \cdot s_H + \sqrt{b^2 - 1 + 2 \cdot a \cdot s_H \cdot (b - 1)} \right]}{2 \cdot P_{2H} \cdot (\lambda + \xi - 1) \cdot (1 + 2 \cdot a \cdot s_H + a^2 \cdot s_H^2)}$$

Зная значения сопротивления  $r_2'$  и отношения  $a = r_1 / r_2'$ , можно определить значения сопротивлений  $r_1$  и  $x_K$ .

Найдем приближенные, оценочные выражения для сопротивлений  $r_2'$  и  $x_K$ . Учитывая, что  $s_H \ll 1$ ,  $b \approx \lambda$  и пренебрегая малыми членами, получим из выражений для  $r_2'$  упрощенное:

$$r_2' \approx R_m \cdot s_H \cdot (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1})$$

[Оглавление](#)

Учитывая выражение для сопротивления  $R_m$  и что  $\lambda + \xi - 1 \approx \lambda$ , получим выражение:

$$r'_2 \approx \frac{3 \cdot U_H^2}{2 \cdot P_{2H}} \cdot s_H \cdot \left( 1 + \frac{\sqrt{\lambda^2 - 1}}{\lambda} \right)$$

Так как множитель  $1 + \sqrt{\lambda^2 - 1} / \lambda$  при изменении  $\lambda$  от 2 до 3,5 изменяется незначительно от 1,78 до 1,96, т.е. в среднем равен 1,915, то:

$$r'_2 \approx 2,87 \cdot \frac{U_H^2}{P_{2H}} \cdot s_H$$

Рассматривая совместно формулу для  $x_K$ , упрощенное выражение для  $r'_2$  и, учитывая что  $r_1 = a \cdot r'_2$ , получим:

$$x_K \approx R_m \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot a \cdot s_H \cdot \left( \lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right)}$$

Так как  $s_H \ll 1$ , то:

$$x_K \approx R_m \approx \frac{3 \cdot U_H^2}{2 \cdot P_{2H} \cdot \lambda}$$

Упрощенные, приближенные формулы завышают значения сопротивлений  $r_1$ ,  $r'_2$ ,  $x_K$ .

Из формул видно, что значения сопротивлений  $r_1$ ,  $r'_2$ ,  $x_K$  тем меньше, чем меньше значение напряжения питания  $U_H$  и чем больше значение мощности  $P_{2H}$ . Также видно, что значение сопротивления  $x_K$  тем меньше, чем больше значение отношения  $\lambda = M_m / M_H$ , а значения сопротивлений  $r_1$  и  $r'_2$  практически не зависят от значения отношения  $\lambda$ .

### **Обоснование необходимости введения поправочного коэффициента $K_{II}$ для расчета значения тока холостого хода**

В методике расчетов значений параметров и характеристик АД приведена формула для расчета значения тока холостого хода:

$$I_{1X} = K_{II} \cdot I_0 \cdot \frac{U}{U_H} \cdot \frac{f_H}{f},$$

где  $I_0$  – ток холостого хода при номинальных значениях питания  $U_H$  и частоты  $f_H$ ,

$K_{II}$  – поправочный коэффициент, зависящий от отношений напряжений  $U / U_H$  и частот  $f / f_H$ . В табл. 7 приведены значения коэффициента  $K_{II}$ . Значение коэффициента  $K_{II}$  тем больше, чем больше значения отношения  $U / U_H$  и отношения  $f_H / f$ .

#### [Оглавление](#)

Коэффициент  $K_{II}$  учитывает следующие обстоятельства. Магнитный поток  $\Phi$  практически пропорционален напряжению  $U$  и обратно пропорционален частоте  $f$ , так что

$$\Phi \approx \Phi_H \cdot \frac{U}{U_H} \cdot \frac{f_H}{f},$$

и нелинейно зависит от намагничивающего тока  $I_M$ .

$\Phi_H$  – номинальный магнитный поток, а  $I_M \approx I_{1X}$ . Поэтому при изменении напряжения  $U$  и частоты  $f$  и соответственно потока  $\Phi$  ток  $I_{1X}$  изменяется больше, чем при несуществующей линейной зависимости  $\Phi(I_{1X})$ .

Если же считать  $K_{II} = 1$ , то при расчетах для  $U \geq 1,1 \cdot U_H$  оказывается, что  $I_1 < I_{1H}$ , а реально  $I_1 > I_{1H}$  из-за значительного увеличения тока  $I_{1X}$ . Введение коэффициента  $K_{II} \neq 1$  устраняет эту ошибку, повышает точность расчетов характеристик АД.

### Указания к построению графиков

Нужно построить рабочие характеристики АД при номинальных значениях напряжения  $U_H$  и частоты  $f_H$ , т.е. графики зависимостей  $M(P_2)$ ,  $n(P_2)$ ,  $P_1(P_2)$ ,  $\eta(P_2)$ ,  $\cos \varphi(P_2)$ ,  $I_1(P_2)$ , а также графики механической  $n(M)$  и электромеханической  $n(I_1)$  характеристик АД по результатам расчетов по п. 3.

Графики должны быть построены на разграфленной в виде сетки координатной плоскости размером А5 (А4/2). Допускается каждую характеристику строить на отдельной координатной плоскости. Для каждой характеристики должна быть указана единица измерения. Каждая шкала должна начинаться с нуля, быть равномерной, без разрывов, с выбранным шагом. Шаг шкалы нужно выбирать кратным (из ряда) 1, 2 или 5, при необходимости нужно умножить на  $10^n$ . Все шкалы должны быть оцифрованы.

Все расчетные зависимости нужно построить с помощью компьютера или вручную ярко, аккуратно, отчетливо.

### Требования к отчету по домашнему заданию

Отчет должен содержать следующие материалы.

Титульный лист – обложку с указанием номера варианта задания, типа рассчитываемого АД, его мощности  $P_{2H}$  и синхронной частоты вращения  $n_0$ .

Текст домашнего задания.

Исходные данные для выполнения домашнего задания (из таблиц 1 или 2, а также из табл. 4).

Схему замещения и векторную диаграмму для одной фазы АД.

### Оглавление

Алгоритмы расчетов по пп. 1 и 2 задания с результатами расчетов. Все числа здесь и ниже должны содержать не менее трех значащих цифр (от 1 до 9).

Алгоритм расчетов по п. 3 задания и результаты расчетов в виде их распечаток с компьютера и в виде заполненной табл. 3.

Алгоритмы расчетов по пп. 4 и 5 задания с результатами расчетов, заполненные табл. 5 и 6.

Графики рабочих характеристик, механической и электромеханической характеристик.

Выводы по результатам проведенных расчетов и построенным графикам в конце каждого пункта задания.

### **Список рекомендуемой литературы**

1. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины. Учебник для ВУЗов.– М.: Энергия, 1980.– 928 с.
2. Вольдек А. И. Электрические машины. Учебник для ВУЗов.– Л.: Энергия, 1974.– 840 с.
3. Сборник задач по электротехнике и основам электроники. Под ред. Пантюшина В. С.– М.: Высшая школа, 1979.– 253 с.
4. Электротехника и основы электроники. Учебник для ВУЗов. Под ред. Глудкина О. П. и Соколова Б. П.– М.: Высшая школа, 1993.– 445 с.