

Министерство образования Российской Федерации
Федеральное бюджетное государственное образовательное учреждение высшего профессионального
образования
«Братский государственный университет»

В.А. Шакиров,
М.А. Федорова

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПУСКОМ И ТОРМОЖЕНИЕМ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

**Методические указания по курсовому проектированию для специалистов по направлению
подготовки «Электроэнергетика»
заочной формы обучения**

Братск 2011

Разработка системы автоматического управления пуском и торможением асинхронного двигателя:
Методические указания / В.А. Шакиров, М.А. Федорова.– Братск: БрГУ, 2011. – 44 с.

В методических указаниях изложена методика выбора асинхронного двигателя с проверкой соответствия мощности нагрузочному режиму. Приведена методика определения числа пусковых ступеней и выбора сопротивлений пусковых резисторов, обеспечивающих заданные условия пуска, методика расчета режима торможения.

Методические указания предназначены для специалистов по направлению подготовки «Электроэнергетика»

Рецензент В.А. Попик
к.т.н., профессор кафедры ЭиЭ
(Братский государственный университет)

Печатается по решению редакционно-издательского совета

ОГЛАВЛЕНИЕ

1.	ЗАДАНИЕ.....	4
2.	ВЫБОР ДВИГАТЕЛЯ.....	7
2.1.	Проверка двигателей по тепловому режиму методом средних потерь.....	8
2.2.	Проверка двигателей методом эквивалентного тока.....	9
2.3.	Проверка двигателей методом эквивалентного момента.....	10
2.4.	Проверка двигателей методом эквивалентной мощности.....	11
3.	РАСЧЕТ ПУСКОВОГО РЕЖИМА.....	12
3.1.	Определение числа пусковых ступеней двигателей.....	12
3.2.	Построение механических характеристик двигателей в пусковом режиме.....	16
4.	РАСЧЕТ РЕЖИМОВ ТОРМОЖЕНИЯ.....	17
4.1.	Расчет сопротивлений резисторов торможения.....	17
4.2.	Построение механических характеристик в режимах торможения.....	18
5.	РАЗРАБОТКА СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ.....	29
6.	ПРИМЕР РАСЧЕТА.....	20
7.	РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.....	40
8.	ПРИЛОЖЕНИЕ.....	41

1. ЗАДАНИЕ

В данной курсовой работе разрабатывается электропривод, механизм которого работает в продолжительном режиме с переменной нагрузкой на валу. Моменты времени, при которых мощность на валу изменяется, приведены в таблице 1.

Зависимости мощности на валу механизма от времени приведены в таблице 2. По данным таблиц 1 и 2 необходимо построить график нагрузки (см. рис. 1).

По заданному графику нагрузки (рис.1) осуществляется выбор двигателей по приложению 1, а также проверка выбранного двигателя различными методами.

Далее производится расчет пускового режима и режима торможения, а также построение механических характеристик для этих режимов работы. По результатам расчетов необходимо разработать схему управления пуском и торможением асинхронного двигателя самостоятельно.

Таблица 1

Моменты времени, при которых мощность на валу механизма изменяется

Вариант	t ₁ , мин	t ₂ , мин	t ₃ , мин	t ₄ , мин	t ₅ , мин	t ₆ , мин
1	50	80	120	160	210	280
2	50	120	200	210	240	270
3	60	100	150	210	230	270
4	40	110	180	200	220	280
5	50	100	150	190	250	280
6	60	90	135	180	240	280
7	40	80	145	195	230	290
8	50	90	175	185	225	290
9	60	95	185	220	245	290
10	30	100	150	210	235	300
11	20	80	165	200	260	300
12	80	140	175	205	250	300
13	90	120	155	195	240	270
14	40	100	165	185	230	270
15	50	95	135	165	200	270
16	80	100	140	195	250	280
17	70	95	150	205	215	280
18	50	100	170	215	260	280

Продолжение таблицы 1

Вариант	t ₁ , мин	t ₂ , мин	t ₃ , мин	t ₄ , мин	t ₅ , мин	t ₆ , мин
19	45	85	150	210	250	290
20	65	90	140	200	235	290
21	75	120	180	195	225	290
22	25	75	140	200	235	300
23	35	80	110	185	200	300
24	45	90	125	175	210	300
25	50	100	190	220	250	270
26	60	120	175	210	245	270
27	40	90	170	200	235	270
28	80	125	165	215	225	280
29	45	105	150	195	210	280
30	65	85	170	200	245	280

Таблица 2

Мощность на валу асинхронного двигателя по интервалам времени

Вариант	P _{c1} , кВт	P _{c2} , кВт	P _{c3} , кВт	P _{c4} , кВт	P _{c5} , кВт	P _{c6} , кВт
1	2,8	4,4	3,5	8,0	2,5	4,2
2	3,6	7,2	6,0	8,0	2,0	1,6
3	5,0	10,0	8,3	11,0	2,8	2,2
4	6,8	13,6	11,3	15,0	3,8	3,0
5	9,1	18,1	15,0	20,0	5,0	4,0
6	6,8	13,6	11,3	15,0	5,0	4,0

7	5,0	10,0	8,3	15,0	3,8	3,0
8	11,8	23,5	19,5	26,0	6,5	5,2
9	12,7	25,3	21,0	28,0	7,0	5,6
10	11,8	23,5	15,0	3,8	21,0	28,0
11	13,6	27,2	22,5	30,0	7,5	6,0
12	15,4	30,8	25,5	34,0	8,5	6,8
13	16,3	32,6	27,0	36,0	9,0	7,2
14	15,4	30,8	25,5	34,0	32,6	27,0
15	16,7	33,5	27,8	37,0	9,3	7,4
16	19,9	39,8	33,0	44,0	11,0	8,8
17	27,2	54,3	45,0	60,0	15,0	12,0
18	33,5	67,0	55,5	74,0	18,5	14,8
19	40,7	81,5	67,5	90,0	22,5	18,0

Продолжение таблицы 2

Вариант	P_{c1} , кВт	P_{c2} , кВт	P_{c3} , кВт	P_{c4} , кВт	P_{c5} , кВт	P_{c6} , кВт
20	49,8	99,6	82,5	110,0	27,5	22,0
21	64,3	128,5	106,5	142,0	35,5	28,4
22	67,9	135,8	112,5	150,0	37,5	30,0
23	81,5	162,9	135,0	180,0	45,0	36,0
24	99,6	199,1	165,0	220,0	55,0	44,0
25	119,0	238,9	198,0	264,0	66,0	52,0
26	144,0	289,6	240,0	220,0	80,0	64,0
27	181,0	362,0	100,0	200,0	120,0	80,0
28	226,0	152,5	175,0	200,0	125,0	100,0
29	215,0	270,2	172,5	130,0	157,0	126,0
30	162,0	124,0	200,0	120,0	150,0	120,0

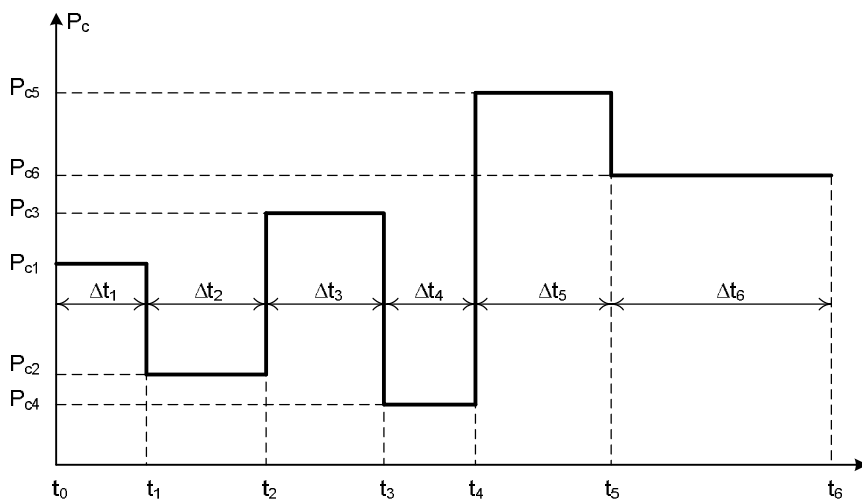


Рис. 1. График нагрузки двигателя

Необходимо разработать следующие вопросы:

1. Выбрать двигатель для заданного графика нагрузки.
2. Рассчитать сопротивления пусковых резисторов.
3. Рассчитать сопротивления для режима торможения.
4. Разработать схему автоматического управления пуском и торможением двигателя.

2. ВЫБОР ДВИГАТЕЛЯ

Для механизмов, работающих в продолжительном режиме с переменной периодически изменяющейся нагрузкой на валу, выбор двигателей по заданному графику нагрузки осуществляется методом последовательных приближений, который состоит в следующем.

Предварительно определяется необходимая мощность двигателя по формуле:

$$P_C = K_3 \frac{\sum_{i=1}^6 P_{Ci} \Delta t_i}{\sum_{i=1}^6 \Delta t_i}, \quad (2.1)$$

где K_3 – коэффициент запаса, принимается равным от 1,1 до 1,2;

P_{Ci} – мощность на валу механизма в течение времени Δt_i ;

Δt_i – длительность интервала времени между моментами t_i и t_{i-1} .

$$\Delta t_i = t_i - t_{(i-1)}, \quad (2.2)$$

где i – «шаг» нагрузочной диаграммы (от 1 до 6).

Производится выбор двигателя, предназначенного для работы в продолжительном режиме, номинальная мощность P_H которого должна быть больше или равна мощности, найденной по формуле (2.1).

$$P_H \geq P_C \quad (2.3)$$

Необходимо записать номинальные данные двигателя, выбранного с соблюдением условия (2.3) из приложения 1.

1. Марка двигателя	
2. Номинальная мощность двигателя	P_H , кВт
3. Коэффициент мощности	$\cos \varphi$, о.е.
4. Синхронная частота вращения	n_0 , об/мин
5. Коэффициент полезного действия	η , %
6. Номинальное скольжение	s_n , %
7. Сопротивление фазы обмотки статора	R_l , Ом
8. Момент инерции двигателя	J_0 , кг·м ²
9. Номинальный ток фазы обмотки ротора	I_{2n} , А
10. Номинальное напряжение фазы обмотки ротора	U_{2n} , В
11. Перегрузочная способность АД	M_K/M_H

2.1. Проверка двигателей по тепловому режиму методом средних потерь

Двигатель не перегревается, если мощность потерь ΔP_C в выбранном двигателе при работе с заданным графиком нагрузки будет меньше потерь в этом же двигателе при номинальной нагрузке:

$$\Delta P_H \geq \Delta P_C, \quad (2.4)$$

где ΔP_H – потери мощности в номинальном режиме, кВт,

$$\Delta P_H = P_H \frac{1 - \eta_H}{\eta_H}; \quad (2.5)$$

ΔP_C – потери мощности в двигателе в течение времени цикла, кВт,

$$\Delta P_C = \frac{\sum_{i=1}^6 \Delta P_{Ci} \Delta t_i}{\sum_{i=1}^6 \Delta t_i}, \quad (2.6)$$

где ΔP_{Ci} – мощность потерь при работе с нагрузкой P_{Ci} , которую следует определять по формуле, кВт:

$$\Delta P_{Ci} = P_{Ci} \frac{1 - \eta_i}{\eta_i} \quad (2.7)$$

Коэффициент полезного действия при нагрузке на валу, равной P_{Ci} :

$$\eta_i = \frac{X_i}{X_i + \frac{(1 - \eta_H)(\alpha + X_i^2)}{\eta_H(\alpha + 1)}} \quad (2.8)$$

где α – отношение постоянных потерь в двигателе к переменным (его значение может быть принято приблизительно равным 0,5);

X_i – коэффициент загрузки двигателя

$$X_i = \frac{P_{Ci}}{P_H} \quad (2.9)$$

Расчет потерь мощности для АД необходимо свести в таблицу 3.

Таблица 3

Результаты проверки двигателей методом средних потерь

i	P_{Ci} , кВт	X_i	η_i	ΔP_{Ci} , кВт
1				
2				
3				
4				
5				
6				

2.2. Проверка двигателей методом эквивалентного тока

Метод эквивалентного тока целесообразно использовать в том случае, когда известен график изменения тока во времени. На реальной установке такой график может быть получен экспериментально, а на этапе проектирования – расчетным путем. Условие правильности выбора выражается следующим соотношением:

$$I_H \geq I_{\text{Э}}, \quad (2.10)$$

где I_H – номинальный ток статора, А;

$I_{\text{Э}}$ – эквивалентный ток, А.

Номинальный ток асинхронного двигателя:

$$I_H = \frac{P_H}{\sqrt{3} U_H \eta_H \cos \varphi}, \quad (2.11)$$

где U_H – номинальное линейное напряжение обмотки статора (при соединении обмотки статора по схеме «звезда» 380 В).

Эквивалентный ток обусловленный графиком нагрузки двигателя:

$$I_{\text{Э}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 I_{Ci}^2 \Delta t_i}{\sum_{i=1}^6 \Delta t_i}}, \quad (2.12)$$

где I_{Ci} – ток главной цепи двигателя (в АД это ток обмотки статора) при нагрузке на валу, равной P_{Ci} .

$$I_{Ci} = \frac{P_{Ci}}{\sqrt{3} U_H \eta_i \cos \varphi} \quad (2.13)$$

Результаты расчета свести в таблицу 4.

Таблица 4

Проверка двигателей методом эквивалентного тока

i	P_{Ci} , Вт	η_i	I_{Ci} , А
1			
2			
...			
5			
6			

2.3. Проверка двигателей методом эквивалентного момента

Выбранный двигатель должен удовлетворять условию

$$M_H \geq M_{\mathcal{E}}, \quad (2.14)$$

где M_H – номинальный вращающий момент выбранного двигателя;

$M_{\mathcal{E}}$ – эквивалентный по условиям нагрева момент двигателя.

Следует иметь в виду, что условие может использоваться только для двигателей, в которых рабочий магнитный поток в воздушном зазоре не изменяется с изменением нагрузки. В реальных условиях с изменением нагрузки, изменяется ток в обмотках двигателя, соответственно и магнитный поток. Но таким изменением магнитного потока можно пренебречь при инженерных расчетах.

Номинальный вращающий момент АД определяется по формуле:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H}, \quad (2.15)$$

Поскольку расчеты ведутся в системе СИ, частоту вращения необходимо перевести в размерность этой системы:

$$\omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{30} \quad (2.16)$$

$$n_H = n_0(1 - s_H) \quad (2.17)$$

Эквивалентный вращающий момент:

$$M_{\mathcal{E}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 M_{Ci}^2 \Delta t_i}{\sum_{i=1}^6 \Delta t_i}}, \quad (2.18)$$

где M_{Ci} – вращающий момент на валу двигателя, обусловленный нагрузкой P_{Ci} :

$$M_{Ci} = \frac{P_{Ci}}{\omega_H} \quad (2.19)$$

Формула справедлива при допущении $\omega_{Ci} = \omega_H = const$

Результаты расчета свести в таблицу 5.

Таблица 5

Проверка двигателей методом эквивалентного момента

i	P_{Ci} , Вт	M_{Ci} , Н·м
1		
2		
3		
4		
5		
6		

2.4 Проверка двигателей методом эквивалентной мощности

Метод эквивалентной мощности пригоден не только для проверки выбранного двигателя, но и для его выбора. При проверке номинальная мощность выбранного двигателя сравнивается с эквивалентной мощностью:

$$P_H \geq P_{\mathcal{E}} \quad (2.20)$$

При определении эквивалентной мощности следует использовать график нагрузки двигателя.

$$P_{\mathcal{E}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 P_{Ci}^2 \Delta t_i}{\sum_{i=1}^6 \Delta t_i}} \quad (2.21)$$

Условие допускается использовать для проверки двигателей с жесткими механическими характеристиками, каковыми являются асинхронные двигатели и двигатели постоянного тока независимого

возбуждения. Частота вращения этих двигателей изменяется незначительно при работе на естественной механической характеристике.

3. РАСЧЕТ ПУСКОВОГО РЕЖИМА

3.1 Определение числа пусковых ступеней двигателей

При пуске двигателей приходится решать две противоречащие друг другу задачи: ограничить пусковой ток до допустимого значения и обеспечить надлежащий пусковой момент.

Допустимые значения пускового момента M_l асинхронного двигателя ограничены его критическим моментом M_k .

$$M_l \leq M_k, \quad (3.1)$$

или

$$M_l = \beta M_k \quad (3.2)$$

где β – коэффициент, меньший единицы (принимается $0,9 \div 0,95$) (для двигателей с меньшей перегрузочной способностью рекомендуется принимать большее значение).

Обеспечить требуемые условия пуска позволяет включение в цепь ротора асинхронного двигателя добавочных резисторов. На рис. 6. представлена схема пуска АД с включением в цепь ротора добавочных сопротивлений. На начальный момент пуска в цепи ротора включены все добавочные резисторы. По мере разгона двигателя добавочные сопротивления выводятся из работы шунтирующими контактами КМ5, КМ4, КМ3. Ознакомиться с работой схемы можно в параграфе 6.5.

В основе расчета пусковых резисторов лежит пусковая диаграмма. На рис.2 изображена пусковая диаграмма для случая двухступенчатого пуска.

На пусковой диаграмме M_2 – момент переключения. При значении этого момента двигатель переходит с одной ступени разгона на другую путем шунтирования резисторов одной ступени. Вращающий момент переключения не должен быть меньше момента сопротивления на валу. Обычно значение момента M_2 составляет

$$M_2 = 1.1 \cdot M_{Cl}, \quad (3.3)$$

где M_{Cl} – момент сопротивления на валу при пуске.

В расчетах рекомендуется принять предварительное значение M_2 в соответствии с $M_{2np} = 1.1 \cdot M_{Cl}$, если $M_{Cl} \geq M_H$, в противном случае

$$M_{2np} = 1.1 \cdot M_H \quad (3.4)$$

Для асинхронных двигателей должны выполняться условия:

$$\lambda = \frac{R_1}{R_{(i-1)}},$$

$$\lambda' = \frac{M_1}{M_2},$$

$$\lambda' \neq \lambda$$

На основе этих выражений проводится выбор числа и величины добавочных резисторов в цепи обмотки ротора.

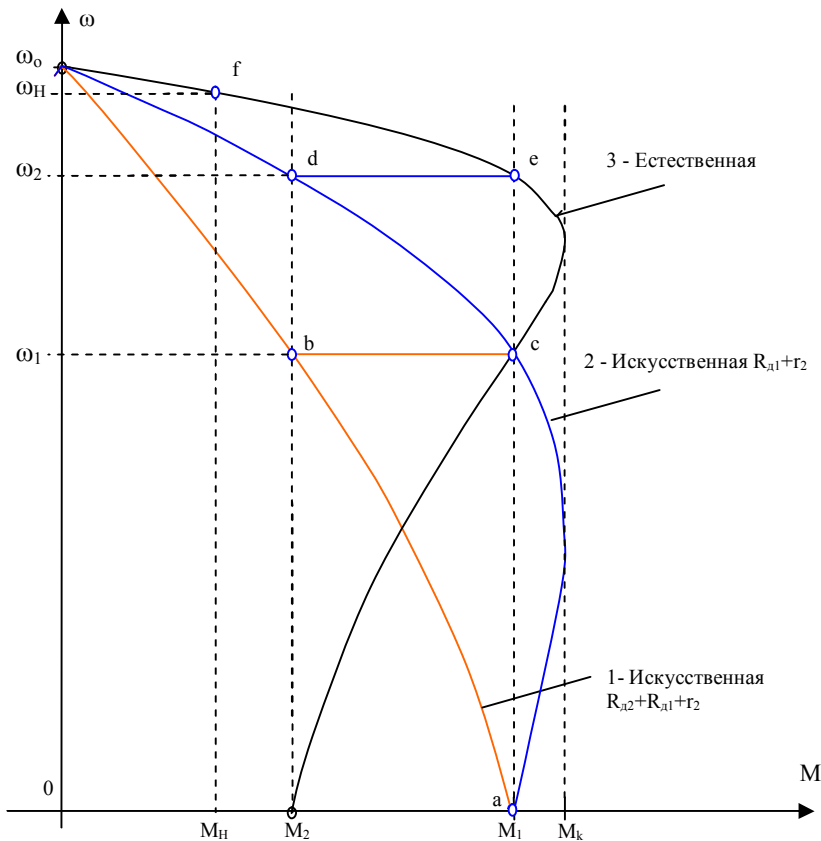


Рис.2 Пусковая диаграмма асинхронного двигателя

Пуск асинхронного двигателя начинается в точке a со скоростью $\omega=0$ и моментом $M=M_1$.

На первом этапе пуск двигателя проходит по участку $a-b$ искусственной характеристики 1. Скорость двигателя повышается от 0 до уровня ω_1 , а момент уменьшается от M_1 до M_2 . При уменьшении момента до M_2 (точка b), добавочные резисторы $R_{\partial 2}$ выводятся из работы автоматикой. Характеристика принимает вид 2. Скорость не успевает измениться и сохраняется на уровне ω_1 . Работа двигателя переходит из точки b в точку c .

На втором этапе пуск проходит по участку $c-d$ искусственной характеристики 2. При уменьшении момента до момента переключения M_2 (точка d), добавочные резисторы $R_{\partial 1}$ выводятся из работы автоматикой. Характеристика принимает вид 3. Скорость не успевает измениться и сохраняется на уровне ω_2 . Работа двигателя переходит из точки d в точку e .

На третьем этапе пуск проходит по участку $e-f$ естественной характеристики 3. Скорость увеличивается до ω_H , а момент уменьшается до M_H (или момента M_{Cl}). В точке f момент двигателя равен моменту сопротивления механизма. Наступает установившийся режим работы асинхронного двигателя. Пуск завершен.

3.1.1 Определение числа пусковых ступеней асинхронных двигателей с фазным ротором

Следует задаться предварительными значениями вращающего момента переключения M_{2np} в соответствии с условиями (3.3) или (3.4) и значением пускового момента M_1 в соответствии с условием (3.2). Значение вращающего момента M_1 не является предварительным и в ходе дальнейших расчетов не должно уточняться.

Необходимо определить предварительно:

$$\lambda'_{np} = \frac{M_1}{M_{2np}} \quad (3.5)$$

На любой ступени пуска отношение значения скольжения, соответствующее вращающему моменту M_1 , к критическому скольжению той же ступени одинаково и равно:

$$\alpha = \frac{1}{\beta} - \sqrt{\frac{1}{\beta^2} - 1} = \frac{s_0}{s_{KE}} = \frac{s_1}{s_{K1}} = \dots \quad (3.6)$$

Выражение (3.6) позволяет определить значение α по известной β (см. стр.13).

Связь между предварительными значениями коэффициентов λ_{np} и λ'_{np} определяется равенством

$$\lambda_{np} = \alpha \left(\frac{\lambda'_{np}}{\beta} + \sqrt{\frac{\lambda'^2_{np}}{\beta^2} - 1} \right), \quad (3.7)$$

Далее необходимо рассчитать значение критического скольжения:

$$s_{KE} = s_H \left(\frac{M_K}{M_H} + \sqrt{\frac{M_K^2}{M_H^2} - 1} \right) \quad (3.8)$$

При подстановке в (3.8) необходимо значение s_n , заданное в процентах, привести к безразмерному виду, поделив на 100.

Предварительное число пусковых ступеней m_{np} равно

$$m_{np} = \frac{\lg \left(\frac{1}{s_0} \right)}{\lg \lambda_{np}} \quad (3.9)$$

Поскольку $\alpha = \frac{s_0}{s_{KE}}$, то

$$s_0 = \alpha s_{KE}$$

Необходимо рассмотреть два значения числа ступеней, полученных в результате округления m_{np} в меньшую m_1 и большую m_2 сторону. Для двух вариантов необходимо провести расчет, который рекомендуется свести в таблицу 6.

Таблица 6

$m=m_1$	$m=m_2$
$\lambda_1 = m_1 \sqrt{\frac{1}{s_0}}$	$\lambda_2 = m_2 \sqrt{\frac{1}{s_0}}$
$\lambda'_1 = \frac{\beta}{2} \left(\frac{\lambda_1}{\alpha} + \frac{\alpha}{\lambda_1} \right)$	$\lambda'_2 = \frac{\beta}{2} \left(\frac{\lambda_2}{\alpha} + \frac{\alpha}{\lambda_2} \right)$
$M_{2np1} = \frac{M_1}{\lambda'_1}$	$M_{2np2} = \frac{M_1}{\lambda'_2}$

Полученные значения M_{2np1} и M_{2np2} необходимо проверить по условиям:

$$M_{2np} > M_{c1}, \text{ если } M_{c1} \geq M_H$$

$$M_{2np} > M_H, \text{ если } M_c < M_H.$$

Вариант, который удовлетворяет требованиям, необходимо принять для дальнейших расчетов.

Если же этим условиям удовлетворяют оба варианта, предпочтение следует отдать варианту с меньшим числом ступеней.

Для дальнейших расчетов следует использовать выбранный вариант с полученными значениями m , M_2 , λ без дополнительных индексов.

3.1.2 Расчет сопротивлений пусковых резисторов

В электроприводах с АД добавочные токоограничивающие пусковые резисторы включаются в три фазы обмотки ротора. Их значения в каждой фазе определяются по формуле:

$$R_{Di} = r_2 (\lambda - 1) \lambda^{i-1}, \quad (3.10)$$

где R_{Di} – добавочное сопротивление фазы обмотки ротора i -ой ступени, i – ступень пуска (от 1 до m), r_2 – собственное активное сопротивление одной фазы обмотки ротора АД.

$$R_{Di} = r_2 (\lambda - 1) \lambda^{i-1} \quad (3.11)$$

$$r_2 = \frac{U_{2H} s_H}{\sqrt{3} \cdot I_{2H}}, \quad (3.12)$$

3.2. Построение механических характеристик в пусковом режиме

Число механических характеристик, участвующих в процессе пуска двигателя, равно $m+1$: одна естественная характеристика и m искусственных. При построении механических характеристик АД в режиме пуска рекомендуется воспользоваться формулой Клосса:

$$M = \frac{2M_k}{\frac{s_{Ki}}{s} + \frac{s}{s_{Ki}}}, \quad (3.13)$$

где критическое скольжение i -ой ступени определяется из выражения

$$s_{Ki} = s_{KE} \frac{R_i}{r_2} \quad (3.14)$$

Суммарное сопротивление i -ой ступени пуска

$$R_i = r_2 + \sum_{j=0}^m R_{Дj} \quad (3.15)$$

Частота вращения, соответствующая скольжению s_i , равна

$$\omega = \omega_0(1 - s), \quad (3.16)$$

где ω_0 – синхронная частота вращения в размерности системы СИ, определяется по справочным данным

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} \quad (3.17)$$

При построении механических характеристик скольжение s в формулах (3.13) и (3.16) следует задавать в пределах от 0 до 1.

Расчет механических характеристик необходимо свести в таблицы вида:

Таблица 7

Расчет значений механической характеристики АД

s	0,01	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
M											
ω											

4. РАСЧЕТ РЕЖИМОВ ТОРМОЖЕНИЯ

4.1. Расчет сопротивлений торможения.

Из всех возможных режимов торможения в курсовой работе рекомендуется рассчитывать режим торможения противовключением асинхронных двигателей.

При торможении противовключением АД с фазным ротором критическое скольжение s_{KT} рекомендуется принять равным 2. Тогда значение сопротивления $R_{ТП}$ добавочного резистора при торможении противовключением равно

$$R_{ТП} = r_2 \left(\frac{2}{s_{KE}} - 1 \right), \quad (4.1)$$

Для торможения следует использовать резисторы, предназначенные для пуска. В случае, если

$$R_{ТП} > r_2 + \sum_{i=1}^m R_{Ди} \quad (4.2)$$

следует дополнить их резисторами до получения значения $R_{ТП}$.

Значение добавочного сопротивления для режима торможения противовключением определится из выражения:

$$R_{добТП} = R_{ТП} - \sum_{i=1}^m R_{Ди} \quad (4.3)$$

Данный резистор необходимо учесть при разработке схемы управления пуском и торможением асинхронного двигателя.

4.2. Построение механических характеристик двигателей в режимах торможения

При торможении противовключением асинхронного двигателя на обмотку статора подается система трехфазных напряжений с другим чередованием фаз, чем при работе в двигательном режиме. При этом ротор в течение всего времени торможения до останова вращается в направлении, противоположном направлению вращения магнитного поля. В связи с этим для расчета механической характеристики $\omega = f(M)$ следует использовать два следующих уравнения:

$$\begin{cases} \omega = \omega_0(1-s), \\ M = \frac{2M_K}{\frac{s_{KT}}{s-2} + \frac{s-2}{s_{KT}}} \end{cases} \quad (4.4)$$

При построении механической характеристики скольжение s следует задавать в пределах от 0 до 1. Результаты расчета для построения механической характеристики необходимо свести в таблицу 8.

Таблица 8

Расчет значений механической характеристики АД

s	0,01	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
M											
ω											

Примерный вид характеристики торможения представлен на рис.3

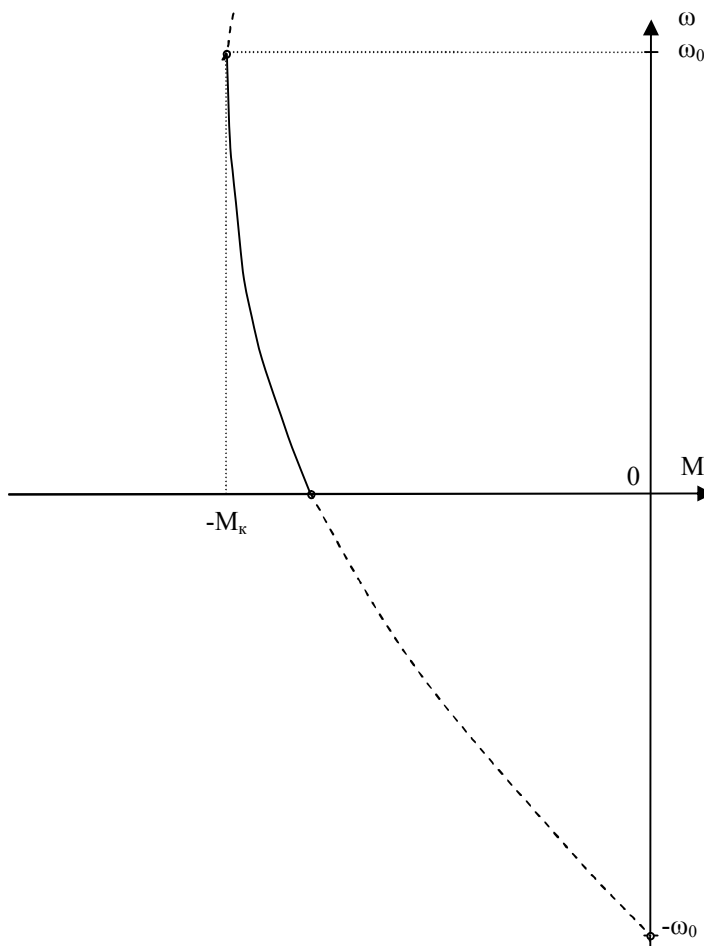


Рис. 3 Зависимость $M=f(\omega)$ при торможении противовключением асинхронного двигателя с фазным ротором

5. РАЗРАБОТКА СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Разработку схемы управления в режимах пуска и торможения двигателя следует выполнить в соответствии с [1, с.119-133,260-268], материалами лекционного курса, соблюдая стандарты [2, с. 133-169, 252-286] на условные графические обозначения. В этих литературных источниках точного аналога разрабатываемого варианта может не быть. Поэтому при разработке схемы и ее описания потребуется самостоятельность, которая может быть приобретена только после тщательного изучения разделов указанной литературы.

6. ПРИМЕР РАСЧЕТА

6.1. Задание

Механизм, для которого разрабатывается электропривод, работает в продолжительном режиме с переменной нагрузкой на валу. Моменты времени, при которых мощность на валу изменяется, приведены в таблице 9.

Мощности на валу механизма по интервалам времени приведены в таблице 10.

Таблица 9

t_1 , мин	t_2 , мин	t_3 , мин	t_4 , мин	t_5 , мин	t_6 , мин
60	93	133	160	170	263

Таблица 10

Вариант	P_{c1} , кВт	P_{c2} , кВт	P_{c3} , кВт	P_{c4} , кВт	P_{c5} , кВт	P_{c6} , кВт
1	2,7	5,4	4,5	6,0	1,5	1,2

6.2. Выбор двигателя

Предварительно определяется необходимая мощность двигателя по формуле:

$$P_c = K_3 \frac{\sum_{i=1}^6 P_{Ci} \Delta t_i}{\sum_{i=1}^6 \Delta t_i},$$

где K_3 – коэффициент запаса, принимается равным 1,1.

P_{Ci} – мощность на валу механизма в течение времени

$$\Delta t_i = (t_i - t_{(i-1)}).$$

Производится выбор двигателя, предназначенного для работы в продолжительном режиме, номинальная мощность P_H которого должна быть больше или равна мощности, найденной по формуле (2.1).

$$P_H \geq P_c$$

Определение длительности временных интервалов по формуле (2.2).

$$\Delta t_1 = (60 - 0) = 60 \text{ мин},$$

$$\Delta t_2 = (93 - 60) = 33 \text{ мин},$$

$$\Delta t_3 = (133 - 93) = 40 \text{ мин},$$

$$\Delta t_4 = (160 - 133) = 27 \text{ мин},$$

$$\Delta t_5 = (170 - 160) = 10 \text{ мин},$$

$$\Delta t_6 = (263 - 170) = 93 \text{ мин},$$

Предварительная мощность двигателя определяется по (2.1):

$$P_c = K_3 \frac{P_{c1} \Delta t_1 + P_{c2} \Delta t_2 + P_{c3} \Delta t_3 + P_{c4} \Delta t_4 + P_{c5} \Delta t_5 + P_{c6} \Delta t_6}{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6}$$

$$= 1,1 \frac{2,7 \cdot 60 + 5,4 \cdot 33 + 4,5 \cdot 40 + 6,0 \cdot 27 + 1,5 \cdot 10 + 1,2 \cdot 93}{60 + 33 + 40 + 27 + 10 + 93} = 3,44 \text{ кВт}$$

Для дальнейших расчетов из таблицы П.1. принимается двигатель ближайшей большей мощности $P_H=4$ кВт с паспортными данными, приведенными в таблице 11.

Таблица 11

Паспортные данные асинхронного двигателя

Мощность	КПД	Коэффициент мощности	Синхронная частота вращения	Номинальное скольжение	Перегрузочная способность	Ток обмотки ротора	Напряжение обмотки ротора	Момент инерции двигателя	Сопротивление обмотки статора	Тип двигателя
P_H , кВт	η , %	$\cos\varphi$	n_0 , об/м	S_H , %	M_K/M_H	I_{2H} , А	U_{2H} , В	J_d , кг·м ²	R_1 , Ом	
4	82	0,78	1000	5	2,5	21	112	0,103	0,652	АОК2-51-6У3

6.2.1. Проверка двигателей по тепловому режиму методом средних потерь

$$\Delta P_H \geq \Delta P_C,$$

где ΔP_H – потери мощности в номинальном режиме,

ΔP_C – потери мощности в двигателе в течение времени цикла,

$$\Delta P_C = \frac{\sum_{i=1}^6 \Delta P_{Ci} \Delta t_i}{\sum_{i=1}^6 \Delta t_i}$$

где ΔP_{Ci} – мощность потерь при работе с нагрузкой P_{Ci} , которую следует определять по формуле:

$$\Delta P_{Ci} = P_{Ci} \frac{1 - \eta_i}{\eta_i}$$

где η_i - коэффициент полезного действия при нагрузке на валу, равной P_{Ci} , определяется по выражению:

$$\eta_i = \frac{X_i}{X_i + \frac{(1 - \eta_H)(\alpha + X_i^2)}{\eta_H(\alpha + 1)}}$$

где $\eta_{ном}$ - коэффициент полезного действия при номинальной нагрузке на валу, определяется из таблицы 11.

где α – отношение постоянных потерь в двигателе к переменным (его значение может быть принято приблизительно равным 0,5);

X_i – коэффициент загрузки двигателя

$$X_i = \frac{P_{Ci}}{P_H}$$

Проведем расчет для первого интервала времени:

$$X_1 = \frac{P_{C1}}{P_H},$$

$$X_1 = \frac{2,7}{4} = 0,68.$$

$$\eta_1 = \frac{X_1}{X_1 + \frac{(1 - \eta_H)(\alpha + X_1^2)}{\eta_H(\alpha + 1)}},$$

$$\eta_1 = \frac{0,68}{0,68 + \frac{(1 - 0,82) \cdot (0,5 + (0,68)^2)}{0,82 \cdot (0,5 + 1)}} = 0,828.$$

$$\Delta P_{C1} = P_{C1} \frac{1 - \eta_1}{\eta_1},$$

$$\Delta P_{C1} = 2,7 \frac{1-0,828}{0,828} = 0,561 \text{ кВт}.$$

Результаты расчета для АД сведены в таблицу 12.

Таблица 12

Расчет потерь активной мощности АД в различных режимах работы

i	X_i	η_i	ΔP_{C_i}
1	0,68	0,828	0,561
2	1,35	0,799	1,358
3	1,13	0,813	1,035
4	1,5	0,788	1,614
5	0,38	0,8	0,375
6	0,3	0,776	0,346

$$\Delta P_C = \frac{\sum_{i=1}^6 \Delta P_{C_i} \Delta t_i}{\sum_{i=1}^6 \Delta t_i} = \frac{\Delta P_{C1} \Delta t_1 + \Delta P_{C2} \Delta t_2 + \Delta P_{C3} \Delta t_3 + \Delta P_{C4} \Delta t_4 + \Delta P_{C5} \Delta t_5 + \Delta P_{C6} \Delta t_6}{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6} =$$

$$= \frac{0,561 \cdot 60 + 1,358 \cdot 33 + 1,035 \cdot 40 + 1,614 \cdot 27 + 0,375 \cdot 10 + 0,346 \cdot 93}{60 + 33 + 40 + 27 + 10 + 93} =$$

$$= 0,758 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_H = P_H \frac{1-\eta_H}{\eta_H}$$

$$\Delta P_H = 4 \cdot \frac{1-0,82}{0,82} = 0,878 \text{ кВт}$$

Проверим выполнение условия:

$$\Delta P_H \geq \Delta P_C$$

Условие для АД выполняется: $0,878 \geq 0,758$.

6.2.2. Проверка двигателей методом эквивалентного тока

Условие правильности выбора выражается следующим соотношением:

$$I_H \geq I_{\text{Э}},$$

где I_H – номинальный ток статора;

$I_{\text{Э}}$ – эквивалентный ток.

Номинальный ток асинхронного двигателя:

$$I_H = \frac{P_H}{\sqrt{3} U_H \eta_H \cos \varphi},$$

где U_H – номинальное линейное напряжение обмотки статора (при соединении обмотки статора по схеме «звезда» 380 В).

Для удобства дальнейших расчетов активную мощность из кВт переводим в Вт, таким образом, получая ток в А.

$$I_H = \frac{4000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,82 \cdot 0,78} = 9,502 \text{ А}$$

Эквивалентный ток, обусловленный графиком нагрузки двигателя:

$$I_{\text{Э}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 I_{C_i}^2 \Delta t_i}{\sum_{i=1}^6 \Delta t_i}},$$

где I_{C_i} – ток обмотки статора АД при нагрузке на валу, равной P_{C_i} .

$$I_{C_i} = \frac{P_{C_i}}{\sqrt{3} U_H \eta_i \cos \varphi}.$$

Проведем расчет для первого интервала времени:

$$I_{C1} = \frac{P_{C1}}{\sqrt{3}U_H \eta_1 \cos \varphi},$$

$$I_{C1} = \frac{2700}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,828 \cdot 0,78} = 6,35 \text{ A}$$

Результаты расчета свести в таблицу 13.

Таблица 13

Расчет тока статора АД в различных режимах работы

i	P_{Ci}	η_i	I_{Ci}
1	2,7	0,828	6,35
2	5,4	0,799	13,16
3	4,5	0,813	10,78
4	6,0	0,788	14,83
5	1,5	0,8	3,65
6	1,2	0,776	3

$$I_{\Sigma} = \sqrt{\frac{I_{C1}^2 \Delta t_1 + I_{C2}^2 \Delta t_2 + I_{C3}^2 \Delta t_3 + I_{C4}^2 \Delta t_4 + I_{C5}^2 \Delta t_5 + I_{C6}^2 \Delta t_6}{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6}}$$

$$= \sqrt{\frac{6,35^2 \cdot 60 + 13,16^2 \cdot 33 + 10,78^2 \cdot 40 + 14,83^2 \cdot 27 + 3,65^2 \cdot 10 + 3^2 \cdot 93}{60 + 33 + 40 + 27 + 10 + 93}} =$$

$$= 8,65 \text{ A}$$

Проверим выполнение условия:

$$I_H \geq I_{\Sigma}$$

$$9,502 \geq 8,65$$

Условие для АД выполняется: $9,502 \geq 8,65$

6.2.3. Проверка двигателей методом эквивалентного момента

Выбранный двигатель должен удовлетворять условию:

$$M_H \geq M_{\Sigma},$$

где M_H – номинальный вращающий момент выбранного двигателя;

M_{Σ} – эквивалентный по условиям нагрева момент двигателя.

Номинальный вращающий момент АД определяется по формуле:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H},$$

Для расчета ω_H определим значение номинальной частоты вращения

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

$$n_H = 1000 \cdot (1 - 0,05) = 950 \text{ об/мин}$$

$$\omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{30}$$

$$\omega_H = \frac{\pi \cdot 950}{30} = 99,48 \text{ рад/с}$$

$$M_H = \frac{4000}{99,48} = 40,21 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Эквивалентный вращающий момент:

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 M_{Ci}^2 \Delta t_i}{\sum_{i=1}^6 \Delta t_i}},$$

где M_{Ci} – вращающий момент на валу двигателя, обусловленный нагрузкой P_{Ci} :

$$M_{Ci} = \frac{P_{Ci}}{\omega_H}$$

Например, для первого интервала времени:

$$M_{C1} = \frac{P_{C1}}{\omega_H}$$

$$M_{C1} = \frac{2700}{99,48} = 27,14 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Формула справедлива при допущении $\omega_{Ci} = \omega_H = \text{const}$

Результаты расчета сведены в таблицу 14.

Таблица 14

Результаты проверки АД методом эквивалентного момента

i	P_{Ci} , Вт	M_{Ci} , Н·м
1	2700	27,14
2	5400	54,28
3	4500	45,24
4	6000	60,31
5	1500	15,08
6	1200	12,06

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 M_{Ci}^2 \Delta t_i}{\sum_{i=1}^6 \Delta t_i}} = \sqrt{\frac{M_{C1}^2 \Delta t_1 + M_{C2}^2 \Delta t_2 + M_{C3}^2 \Delta t_3 + M_{C4}^2 \Delta t_4 + M_{C5}^2 \Delta t_5 + M_{C6}^2 \Delta t_6}{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6}} =$$

$$= \sqrt{\frac{22,1^2 \cdot 60 + 54,3^2 \cdot 33 + 45,2^2 \cdot 40 + 60,3^2 \cdot 27 + 15,1^2 \cdot 10 + 12,1^2 \cdot 93}{60 + 33 + 40 + 27 + 10 + 93}} =$$

$$= 35,02 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Условие $M_H \geq M_{\text{э}}$ для АД выполнено: $40,21 \geq 35,02$.

6.2.4 Проверка двигателей методом эквивалентной мощности

$$P_H \geq P_{\text{э}}$$

При определении эквивалентной мощности следует использовать график нагрузки двигателя.

Для АД:

$$P_{\text{э}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 P_{Ci}^2 \Delta t_i}{\sum_{i=1}^6 \Delta t_i}} = \sqrt{\frac{P_{C1}^2 \Delta t_1 + P_{C2}^2 \Delta t_2 + P_{C3}^2 \Delta t_3 + P_{C4}^2 \Delta t_4 + P_{C5}^2 \Delta t_5 + P_{C6}^2 \Delta t_6}{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6}} =$$

$$= \sqrt{\frac{2,7^2 \cdot 60 + 5,4^2 \cdot 33 + 4,5^2 \cdot 40 + 6^2 \cdot 27 + 1,5^2 \cdot 10 + 1,2^2 \cdot 93}{60 + 33 + 40 + 27 + 10 + 93}} = 3,56 \text{ кВт}$$

Условие для АД выполнено: $4 \geq 3,56$.

6.3. РАСЧЕТ ПУСКОВОГО РЕЖИМА

6.3.1 Определение числа пусковых ступеней двигателей

Допустимые значения пускового момента M_1 асинхронного двигателя ограничены его критическим моментом M_K .

$$M_1 \leq M_K,$$

или

$$M_1 = \beta M_K$$

где β – коэффициент, меньший единицы (принимается 0,9)

Определим M_K по паспортным данным

$$\frac{M_K}{M_H} = 2,5$$

$$M_K = 2,5 \cdot M_{ном} = 2,5 \cdot 40,21 = 100,525 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_1 = \beta M_K = 0,9 \cdot 100,525 = 90,473 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

В основе расчета пусковых резисторов лежит пусковая диаграмма. На пусковой диаграмме M_2 – момент переключения. При значении этого момента двигатель переходит с одной ступени разгона на другую. Вращающий момент переключения не должен быть меньше момента сопротивления на валу. Обычно значение момента M_2 составляет

$$M_2 = 1,1 \cdot M_{C1},$$

где M_{C1} – момент сопротивления на валу при пуске.

При определении M_2 следует исходить из условий:

Если $M_{C1} > M_H$, то

$$M_2 = 1,1 \cdot M_{C1},$$

Если $M_H > M_{C1}$, то

$$M_2 = 1,1 \cdot M_H$$

Номинальный момент известен из пункта 6.2.3

$$M_H = 40,21 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$M_H > M_{C1}$ ($M_{C1} = 27,14$ из таблицы 14), следовательно предварительное значение M_2 :

$$M_{2np} = 1,1 \cdot 40,21 = 44,231 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

6.3.1.1 Определение числа пусковых ступеней асинхронных двигателей с фазным ротором

Следует задаться предварительными значениями вращающего момента переключения M_{2np} в соответствии с $M_2 = 1,1 \cdot M_H$ и значением M_1 в соответствии с $M_1 = \beta M_K$.

Необходимо определить предварительно:

$$\lambda'_{np} = \frac{M_1}{M_{2np}}$$

$$\lambda'_{np} = \frac{90,473}{44,231} = 2,045$$

На любой ступени пуска отношение значения скольжения, соответствующее вращающему моменту M_1 , к критическому скольжению той же ступени одинаково и равно:

$$\alpha = \frac{1}{\beta} - \sqrt{\frac{1}{\beta^2} - 1} = \frac{s_0}{s_{KE}} = \frac{s_1}{s_{K1}} = \dots$$

Необходимо определить значение α по выбранному β .

$$\alpha = \frac{1}{\beta} - \sqrt{\frac{1}{\beta^2} - 1}$$

$$\alpha = \frac{1}{0,9} - \sqrt{\frac{1}{0,9^2} - 1} = 0,627$$

Связь между предварительными значениями коэффициентов λ_{np} и λ'_{np} определяется равенством

$$\lambda_{np} = \alpha \left(\frac{\lambda'_{np}}{\beta} + \sqrt{\frac{\lambda'^2_{np}}{\beta^2} - 1} \right)$$

$$\lambda_{np} = 0,627 \left(\frac{2,045}{0,9} + \sqrt{\frac{2,045^2}{0,9^2} - 1} \right) = 2,704$$

Далее необходимо рассчитать значение критического скольжения:

$$s_{KE} = s_H \left(\frac{M_K}{M_H} + \sqrt{\frac{M_K^2}{M_H^2} - 1} \right)$$

$$s_{KE} = 5 \cdot (2,5 + \sqrt{2,5^2 - 1}) = 0,24$$

Предварительное число пусковых ступеней m_{np} определяется по формуле:

$$m_{np} = \frac{\lg\left(\frac{1}{s_0}\right)}{\lg \lambda_{np}}$$

Определим значение s_0 . Поскольку $\alpha = \frac{s_0}{s_{KE}}$, то

$$s_0 = \alpha s_{KE}$$

$$s_0 = 0,627 \cdot 0,24 = 0,1502$$

$$m_{np} = \frac{\lg\left(\frac{1}{0,1502}\right)}{\lg 2,704} = 1,946$$

Необходимо рассмотреть два значения числа ступеней, полученных в результате округления m_{np} в меньшую m_1 и большую m_2 сторону. Целым значениям числа ступеней соответствуют два уточненных значения коэффициентов нарастания сопротивлений.

Таблица 15

Расчет параметров пуска при различных m

$m=1$	$m=2$
$\lambda_1 = \sqrt[m_1]{\frac{1}{s_0}} = \sqrt[1]{\frac{1}{0,1502}} = 6,658$	$\lambda_2 = \sqrt[m_2]{\frac{1}{s_0}} = \sqrt[2]{\frac{1}{0,1502}} = 2,58$
$\lambda'_1 = \frac{\beta}{2} \left(\frac{\lambda_1}{\alpha} + \frac{\alpha}{\lambda_1} \right) =$ $= \frac{0,9}{2} \left(\frac{6,658}{0,627} + \frac{0,627}{6,658} \right) = 4,821$	$\lambda'_2 = \frac{\beta}{2} \left(\frac{\lambda_2}{\alpha} + \frac{\alpha}{\lambda_2} \right) =$ $= \frac{0,9}{2} \left(\frac{2,58}{0,627} + \frac{0,627}{2,58} \right) = 1,961$
$M_{2np1} = \frac{M_1}{\lambda'_1} =$ $= \frac{90,473}{4,821} = 18,766 \text{ H} \cdot \text{м}$	$M_{2np2} = \frac{M_1}{\lambda'_2} =$ $= \frac{90,473}{1,961} = 46,136 \text{ H} \cdot \text{м}$

Из двух значений числа ступеней следует выбрать тот, который обеспечивает выполнение условия $M_2 > M_H$. Если же этим условиям удовлетворяют оба варианта, предпочтение следует отдать меньшему числу ступеней.

В данном примере следует принять число ступеней равным 2. Так как только в этом случае $M_{2np2} > M_H$ ($M_H = 40,21$).

Для дальнейших расчетов принимаются следующие параметры пуска (параметры второй колонки при $m=2$):

$$\begin{aligned} m &= 2, \\ M_2 &= 46,136 \text{ H} \cdot \text{м} \\ \lambda &= 2,58 \\ \lambda' &= 1,961 \end{aligned}$$

6.3.1.2 Расчет пусковых сопротивлений

В электроприводах с АД добавочные токоограничивающие пусковые резисторы включаются в три фазы обмотки ротора. Их значения в каждой фазе определяются по формуле:

$$R_{Дi} = r_2(\lambda - 1)\lambda^{i-1},$$

где r_2 – собственное активное сопротивление одной фазы обмотки ротора АД.
 i – принимает значения от 1 до m (числа ступеней).

$$r_2 = \frac{U_{2н} S_n}{\sqrt{3} \cdot I_{2н}}$$

$$r_2 = \frac{112 \cdot 0,05}{\sqrt{3} \cdot 21} = 0,154 \text{ Ом}$$

Расчет добавочного сопротивления $R_{Д1}$ при $i=1$.

$$R_{Д1} = r_2(\lambda - 1)\lambda^{1-1}$$

$$R_{Д1} = 0,154 \cdot (2,58 - 1) \cdot 1 = 0,243 \text{ Ом}$$

Расчет добавочного сопротивления $R_{Д2}$ при $i=2$.

$$R_{Д2} = r_2(\lambda - 1)\lambda^{2-1}$$

$$R_{Д2} = 0,154 \cdot (2,58 - 1) \cdot 2,58 = 0,628 \text{ Ом}$$

6.3.2. Построение механических характеристик в пусковом режиме

Число механических характеристик, участвующих в процессе пуска двигателя, равно $m+1$: одна естественная характеристика и m искусственных. При построении механических характеристик АД в режиме пуска рекомендуется воспользоваться формулой Клосса:

$$M = \frac{2M_k}{\frac{s_{ki}}{s} + \frac{s}{s_{ki}}},$$

где критическое скольжение i -ой ступени определяется из выражения

$$s_{ki} = s_{KE} \frac{R_i}{r_2}$$

Суммарное сопротивление i -ой ступени пуска

$$R_i = r_2 + \sum_{j=0}^i R_{Дj}$$

Частота вращения, соответствующая скольжению S_i равна

$$\omega = \omega_0(1 - s),$$

где синхронная частота вращения в размерности системы СИ определяется по справочным данным

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30}$$

При построении механических характеристик скольжения s в формулах следует задавать в пределах от 0 до 1.

Расчет для естественной механической характеристики – таблица 16

$$M = \frac{2M_k}{\frac{s_{KE}}{s} + \frac{s}{s_{KE}}}$$

$$M = \frac{2 \cdot 100,525}{\frac{0,24}{s} + \frac{s}{0,24}}$$

$$\omega = \omega_0(1 - s)$$

$$\omega = 104,72 \cdot (1 - s)$$

Таблица 16

К построению естественной механической характеристики

s	0,05	0,1	0,2	0,24	0,3	0,5	0,7	0,9	1
M	40,14	71,37	98,87	100,5	98,07	78,43	61,68	50,05	45,62
ω	99,48	94,24	83,77	79,58	73,30	52,36	31,41	10,47	0

Расчет для искусственной механической характеристики при $R_{\partial 1}=0,243$ Ом - таблица 17

Сопротивление цепи ротора с учетом добавочных сопротивлений:

$$R_1 = r_2 + R_{\partial 1}$$

$$R_1 = 0,154 + 0,243 = 0,397 \text{ Ом}$$

Значение критического скольжения с включенным добавочным сопротивлением:

$$s_{K1} = s_{KE} \frac{R_1}{r_2}$$

$$s_{K1} = 0,24 \cdot \frac{0,397}{0,154} = 0,619$$

Построение искусственной механической характеристики проводится в соответствии с формулой:

$$M = \frac{2M_k}{\frac{s_{K1}}{s} + \frac{s}{s_{K1}}}$$

$$M = \frac{2 \cdot 100,525}{\frac{0,619}{s} + \frac{s}{0,619}}$$

Таблица 17

К построению искусственной механической характеристики $r_2+R_{\partial 1}=0,397$ Ом

s	0,05	0,1	0,2	0,3	0,5	0,619	0,7	0,9	1
M	16,1	31,6	58,81	78,90	98,27	100,5	99,77	93,8	89,97
ω	99,4	94,2	83,77	73,30	52,36	39,89	31,41	10,4	0

Расчет для искусственной механической характеристики при $R_{\partial 1}=0,628$ Ом - таблица 18

$$R_2 = r_2 + R_{\partial 1} + R_{\partial 2}$$

$$R_2 = 0,154 + 0,243 + 0,628 = 1,025 \text{ Ом}$$

$$s_{K2} = s_{KE} \frac{R_2}{r_2}$$

$$s_{K2} = 0,24 \cdot \frac{1,025}{0,154} = 1,597$$

Построение искусственной механической характеристики проводится в соответствии с формулой:

$$M = \frac{2M_k}{\frac{s_{K2}}{s} + \frac{s}{s_{K2}}}$$

$$M = \frac{2 \cdot 100,525}{\frac{1,597}{s} + \frac{s}{1,597}}$$

Таблица 18

К построению искусственной механической характеристики $r_2+R_{\partial 2}+R_{\partial 1}=1,025$

s	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1
M	6,28	12,5	24,79	36,48	47,38	57,33	66,19	80,51	90,43
ω	99,48	94,24	83,77	73,30	62,83	52,36	41,88	20,94	0

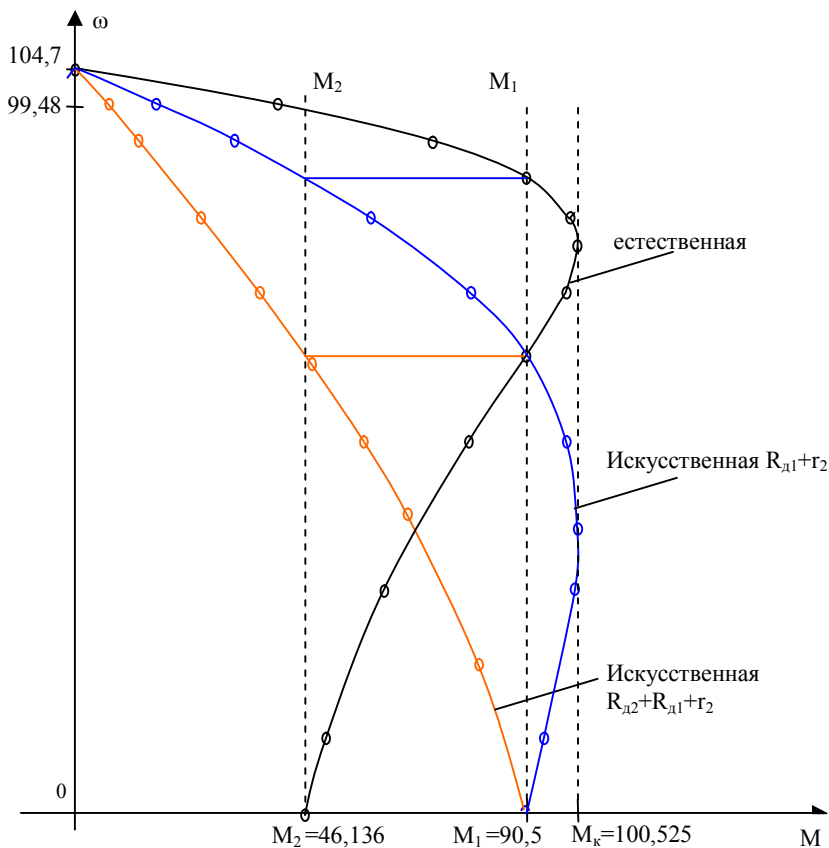


Рис.4. Пусковая диаграмма асинхронного двигателя

6.4. РАСЧЕТ РЕЖИМОВ ТОРМОЖЕНИЯ

6.4.1. Расчет сопротивлений торможения.

Из всех возможных режимов торможения рекомендуется использовать режим торможения противовключением асинхронных двигателей.

При торможении АД с фазным ротором в режиме противовключения критическое скольжение $\underline{s_{KT}}$ рекомендуется принять равным 2. Тогда соответствующее этому режиму значение сопротивления $R_{ТП}$ добавочного резистора торможения противовключения равно

$$R_{ТП} = r_2 \left(\frac{2}{s_{KE}} - 1 \right)$$

Для торможения следует использовать резисторы, предназначенные для пуска. Если их недостаточно, следует дополнить резисторами до получения значения $R_{ТП}$.

$$R_{ТП} = r_2 \left(\frac{2}{s_{KE}} - 1 \right)$$

$$R_{ТП} = 0,154 \left(\frac{2}{0,24} - 1 \right) = 1,13 \text{ Ом}$$

Поскольку $R_{д1} + R_{д2} = 0,243 + 0,628 = 0,871$, необходима установка дополнительного резистора:

$$R_{\text{добТП}} = R_{ТП} - \sum_{i=1}^m R_{дi}$$

$$R_{д3} = R_{ТП} - (R_{д1} + R_{д2})$$

$$R_{д3} = 1,13 - 0,871 = 0,259 \text{ Ом}$$

6.4.2. Построение механических характеристик двигателей в режимах торможения

При торможении противовключением асинхронного двигателя на обмотку статора подается система трехфазных напряжений с другим чередованием фаз, чем при работе в двигательном режиме. При этом ротор в течение всего времени торможения до останова вращается в направлении, противоположном направлению вращения магнитного поля. В связи с этим для расчета механической характеристики $\omega = f(M)$ следует использовать два следующих уравнения:

$$\begin{cases} \omega = \omega_0(1 - s), \\ M = \frac{2M_K}{\frac{s_{KT}}{s-2} + \frac{s-2}{s_{KT}}}. \end{cases}$$

При построении механической характеристики скольжение s следует задавать в пределах от 0 до 1.

Приведем пример расчета для скольжения $s=0,05$.

$$\omega = \omega_0(1 - s)$$

$$\omega = 104,72 \cdot (1 - 0,05) = 99,48 \text{ рад/с}$$

$$M = \frac{2M_K}{\frac{s_{KT}}{s-2} + \frac{s-2}{s_{KT}}}$$

В соответствии с приведенными выше рекомендациями s_{KT} принимаю равным 2.

$$M = \frac{2 \cdot 100,525}{\frac{2}{0,05-2} + \frac{0,05-2}{2}} = -100,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Результаты расчет для построения механической характеристики представлены в таблице 19.

Таблица 19

s	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
M	-100,5	-100,3	-99,97	-99,21	-98,07	-96,50	-94,45	-91,87	-88,7	-84,9	-80,42
ω	99,48	94,24	83,77	73,30	62,83	52,36	41,88	31,41	20,94	10,47	0

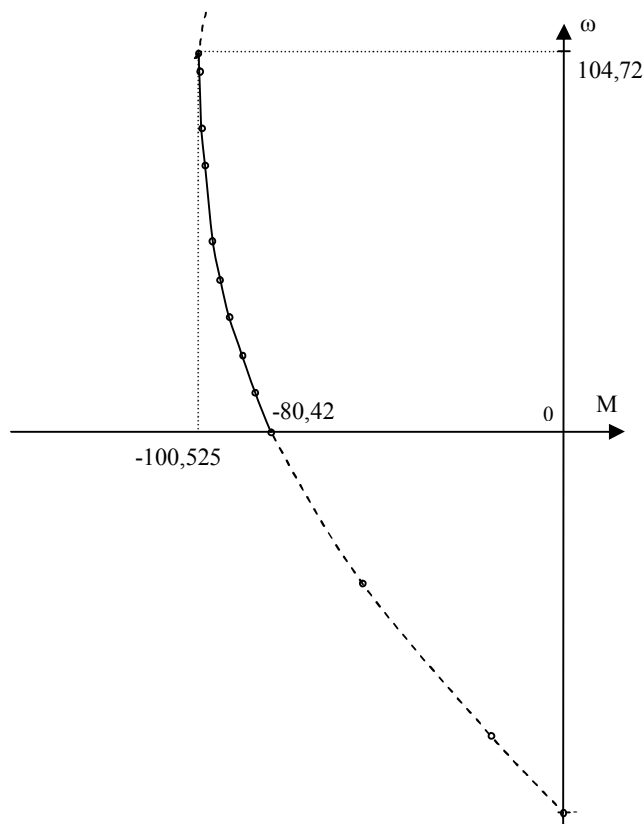


Рис. 5. Торможение противовключением АД с фазным ротором

6.5. СХЕМА УПРАВЛЕНИЯ

На рис. 6 представлена схема пуска АД в две ступени в функции времени и торможения противовключением в функции ЭДС.

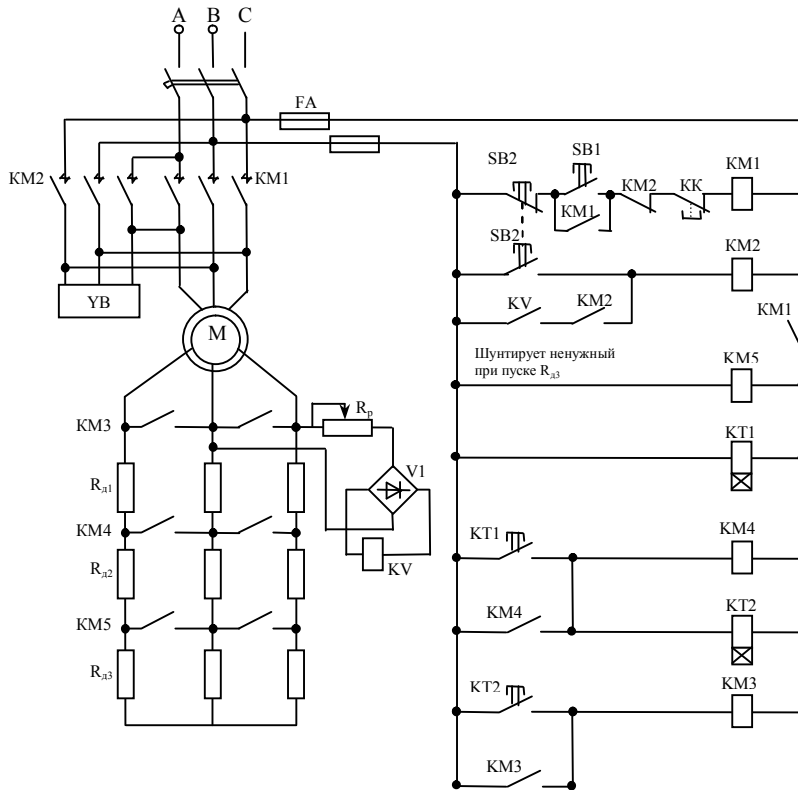


Рис. 6. Схема пуска АД в две ступени в функции времени и торможения противовключением в функции ЭДС

При включении кнопки SB1 катушка контактора KM1 получает питание. Замыкаются силовые контакты KM1 в цепи статора АД, подавая напряжение на двигатель. Одновременно подается питание на электромагнитный тормоз YB, что позволяет валу начать свободно вращаться. Замыкается блок-контакт KM1, шунтируя кнопку SB1. Также замыкается блок-контакт KM1, подавая напряжение на катушку контактора KM5 и катушку реле времени KT1.

Когда на катушку KM5 подается напряжение, замыкаются контакты KM5 в цепи ротора АД. При этом шунтируются ненужные при пуске резисторы торможения R_{d3}.

Когда на катушку реле времени KT1 подается напряжение, через выдержку времени t_1 замыкаются контакты KT1. В течение этой выдержки времени производится пуск АД с полным набором добавочных сопротивлений R_{d1} и R_{d2}.

При замыкании контактов KT1, катушка KM4 получает питание.

Замыкаются силовые контакты KM4 в цепи ротора АД, что приводит к шунтированию добавочных резисторов R_{d2}. Замыкаются блок-контакты KM4 в цепи реле KT2. Через выдержку времени t_2 замыкаются контакты KT2. В течение выдержки времени t_2 пуск продолжается с добавочными сопротивлениями R_{d1}. При замыкании контактов KT2 катушка контактора KM3 получает питание. Замыкаются силовые контакты KM3 в цепи ротора АД, что приводит к шунтированию сопротивлений R_{d1}.

Все добавочные сопротивления выведены из работы. Двигатель переходит на естественную характеристику и продолжает пуск до выхода скорость, соответствующую моменту сопротивлению.

Управление торможением в схеме обеспечивает реле напряжения KV, контролирующее уровень ЭДС (скорости) ротора. С помощью резистора R_p оно регулируется таким образом, чтобы при пуске ($0 < s < 1$) наводимая в роторе ЭДС была бы недостаточна для включения, а в режиме противовключения ($1 < s < 2$) достаточна.

Для торможения АД необходимо нажать SB2, размыкающий контакт которой, разорвав цепь питания катушки контактора KM1, отключает АД от сети, при этом разорвется цепь питания контактора KM5, KM4, KM3. В цепь ротора вводятся сопротивления R_{d1}+R_{d2}+R_{d3}.

Нажатие кнопки SB2 одновременно приводит к замыканию цепи питания катушки контактора KM2, который включившись, вновь подключает двигатель к сети, но уже с другим чередованием фаз сетевого

напряжения на статоре, т.е. АД переходит в режим торможения противовключением. При этом реле KV срабатывает и после отпускания кнопки SB2 будет обеспечивать питание контактора KM2 через свой и его замыкающий контакт.

В конце торможения, когда скорость будет близка к нулю и ЭДС ротора уменьшится, реле KV отключится и своим размыкающим контактом разорвет цепь питания катушки контактора KM2.

Последний, потеряв питание, отключит двигатель от сети, и схема придет в исходное положение. При этом YB, также потеряв питание, обеспечит фиксацию (торможение) вала АД.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
2. Александров К.К., Кузьмина Е.Г. Электротехнические чертежи и схемы. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
3. Москаленко В.В. Электрический привод. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 368 с.
4. Онищенко Г.Б. Электрический привод. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 288 с.

Технические данные асинхронных двигателей серии АОК и 4АК. Напряжение 220/380

Мощность	К.П.Д.	Коэффициент мощности	Синхронная частота вр.	Номинальное скольжение	Перегрузочная способность	Ток обмотки ротора	Напр. обм. ротора	Мом.инерции двигателя	Сопротивление обмотки статора	Тип двигателя
P_n , кВт	η_n , %	$\cos\varphi$ о.е.	n_0 , об/м	S_n , %	$\frac{M_k}{M_n}$ о.е.	I_{2n} , А	U_{2n} , В	J_d , кг·м ²	R_1 , Ом	
3	78	0,71	750	6	2	15	116	0,1	-	АОК2-51-8У3
4	80	0,72	750	6	2	15	157	0,13	-	АОК2-52-8У3
4	82	0,78	1000	5	2,5	21	112	0,103	-	АОК2-51-6У3
5,5	80	0,7	750	6,5	2,5	14	300	0,14	0,652	4АК160S8У3
5,5	82	0,72	750	5,3	1,7	32	115	0,26	-	АОК2-61-8У3
5,5	83	0,78	1000	5	2,5	21	153	0,135	-	АОК2-52-6У3
5,5	85	0,82	1500	5,3	2,5	15	211	0,07	-	АОК2-51-4У3
7,5	82	0,7	750	6	3	16	290	0,18	0,456	АК160М8У3
7,5	82,5	0,77	1000	5	3,5	18	300	0,14	0,481	4АК160S6У3
7,5	84	0,82	1000	4	1,8	35	140	0,24	-	АОК2-61-6У3
7,5	87	0,8	1500	5,3	2,5	15	298	0,085	-	АОК2-52-4У3
10	84,5	0,76	1000	4,5	3,8	20	310	0,18	0,290	4АК160М6У3
10	85	0,82	1500	5,3	2	40	160	0,14	-	АОК2-61-4У3
11	85	0,72	750	4	3,5	25	270	0,25	0,243	4АК180М8У3
11	85	0,72	750	5	3,2	22,5	315	0,235	0,319	4АНК180S8У3
11	86,5	0,86	1500	5	3	22	305	0,103	0,270	4АК160S4У3
13	85,5	0,8	1000	4,5	4	25	325	0,22	0,194	4АК180М6У3
13	83,5	0,81	1000	7	3	4,2	205	0,236	0,267	4АНК180S6У3
14	86,5	0,69	750	4,5	3,5	28	310	0,396	0,225	4АНК180М8У3
14	88,5	0,87	1500	4	3,5	29	300	0,118	0,188	4АК160М4У3
14	86,5	0,85	1500	5	3	27	330	0,093	0,261	4АНК160S4У3
15	86	0,7	750	3,5	3	28	360	0,489	0,194	4АК200М8У3

Продолжение таблицы П.1

P_n , кВт	η_n , %	$\cos\varphi$ о.е.	n_0 , об/м.	S_n , %	$\frac{M_k}{M_n}$ о.е.	I_{2n} , А	U_{2n} , В	J_d , кг·м ²	R_1 , Ом	Тип двигателя
17	85	0,82	1000	6	3	32,5	335	0,236	0,226	4АНК180М6У3
17	88	0,87	1500	5	3,5	34	315	0,118	0,168	4АНК160М4У3
18	89	0,88	1500	3,5	4	38	295	0,218	0,099	4АК180М4У3
18,5	86	0,73	750	3,5	3	40	300	0,423	0,074	4АК200L4У3
18,5	86	0,78	750	4,5	2,5	30	380	0,489	0,185	4АНК200М8У3
22	87	0,82	750	4,5	2,2	140	102	0,825	0,140	4АК225М8У3
22	87	0,79	750	4,5	2,5	40	330	0,582	0,146	4АНК200L8У3
22	88	0,8	1000	3,5	3,5	45	330	0,429	0,121	4АК200L6У3
22	88	0,81	1000	3,5	3	37	380	0,377	0,121	4АНК200М6У3
22	90,5	0,87	1500	2,5	4	45	340	0,345	0,090	4АК200М4У3
22	87	0,86	1500	5,5	3,2	43	300	0,177	0,137	4АНК180S4У3
30	88,5	0,81	750	4	2,2	155	125	1,192	0,099	4АК250S8У3
30	86,5	0,8	750	5	1,8	165	120	0,825	0,115	4АНК225М8У3

30	89	0,85	1000	3,5	2,5	150	140	0,702	0,094	4AK225M6Y3
30	88,5	0,82	1000	4	3	46	375	0,429	0,090	4АНК200L6Y3
30	90,5	0,87	1500	2,5	4	55	350	0,423	0,074	4AK200L4Y3
30	88	0,81	1500	4,5	3,2	63	290	0,218	0,080	4АНК180M4Y3
37	89	0,8	750	3,5	2,2	155	148	0,957	0,071	4AK250M8Y3
37	87,5	0,8	750	5,5	2,2	190	115	1,192	0,086	4АНК250SA8Y
37	89	0,84	1000	3,5	2,5	165	150	1,089	0,063	4AK250S6Y3
37	89	0,86	1000	4	1,9	180	140	1,400	0,082	4АНК225M6Y3
37	90	0,87	1500	3,5	3	160	0.604	0.053	0.053	4AK225M4Y3
37	90	0,88	1500	3	3	62	360	0,345	0,072	4АНК200M4Y3
45	89	0,82	750	4	2,2	190	140	1,192	0,067	4АНК250SB8Y
45	90,5	0,87	1000	3	2,5	160	180	1,400	0,048	4AK250M6Y3
45	89,5	0,86	1000	4	2,3	200	155	1,089	0,063	4АНК250SA6Y
45	91	0,88	1500	3	3	170	230	0,882	0,039	4AK250SA4Y3
45	90	0,88	1500	3,5	3	75	375	0,423	0,060	4АНК200L4Y3
55	89,5	0,83	750	3,5	2,2	185	190	1,400	0,052	4АНК250M8Y3
55	91	0,88	1000	3,5	2,5	185	190	1,089	0,044	4АНК250SB6Y
55	90,5	0,9	1500	3	3	170	200	0,882	0,028	4AK250SB4Y3

Продолжение таблицы П.1

$P_H,$ кВт	$\eta_H,$ %	$\cos\varphi$ о.е.	$n_0,$ об/м.	$S_H,$ %	$\frac{M_K}{M_H}$ о.е.	$I_{2H},$ А	$U_{2H},$ В	$J_d,$ кг·м ²	$R_1,$ Ом	Тип двигателя
55	89,5	0,87	1500	4	2,5	200	170	0,604	0,049	4АНК225M4Y3
75	90,5	0,84	750	4	1,9	257	190	1,200	0,032	4АНК280S8Y3
75	91,5	0,85	1000	3	2,5	200	250	1,400	0,031	4АНК250M6Y
75	90	0,88	1500	4,5	2,3	250	180	0,882	0,033	АНК250SA4Y
90	90,5	0,84	750	4	1,9	264	214	4,100	0,026	4АНК280M8Y3
90	90	0,88	1000	3,6	1,9	277	202	2,900	0,030	4АНК280S6Y3
90	91,5	0,87	1500	4	2,5	260	220	0,882	0,021	4АНК250SB4Y
110	91,5	0,84	750	3,5	1,9	311	225	4,900	0,021	4АНК315S8Y3
110	91,5	0,87	1000	3,6	1,9	297	230	3,400	0,025	4АНК280M6Y3
110	92	0,9	1500	3,5	2,5	260	250	0,957	0,019	4АНК250M4Y3
132	92	0,84	750	3,5	1,9	364	247	3,700	0,055	4АНК315M8Y
132	92	0,88	1000	3	1,9	320	257	4,000	0,049	4АНК315S6Y3
132	92	0,88	1500	2,9	2	330	251	3,100	0,052	4АНК280S4Y3
160	92,5	0,86	750	2,7	1,7	353	285	9,000	0,036	4АНК355S8Y
160	92,5	0,88	1000	3	1,9	352	291	4,500	0,049	4АНК315M6Y3
160	92,5	0,88	1500	2,6	2	330	300	2,500	0,051	4АНК280M4Y3
200	92,5	0,86	750	2,7	1,7	359	350	10,00	0,026	4АНК355M8Y
200	93	0,89	1000	2,5	1,8	411	304	7,300	0,032	4АНК355S6Y3
200	93	0,89	1500	2,5	2	396	312	3,100	0,028	4АНК315S4Y3
250	93	0,89	1000	2,5	1,8	401	380	8,800	0,022	4АНК355M6Y3
250	93	0,9	1500	2,5	2	425	360	3,600	0,023	4АНК315M4Y3
250	93	0,9	1500	2,5	2	425	360	3,600	0,023	4АНК315M4Y3
315	93,5	0,9	1500	2,2	2	460	420	6,000	0,016	4АНК355S4Y3
400	94	0,9	1500	2	2	485	505	7,000	0,013	4АНК355M4Y3