

Тема № 4:

Асинхронный электропривод.

1. Паспортные данные 3-фазных АД.
2. Построение естественной механической характеристики 3-фазного асинхронного двигателя по паспортным и каталожным данным.
3. Схема замещения 3-фазного асинхронного электродвигателя. Параметры схемы замещения.
4. Вывод уравнения механической характеристики 3-фазного асинхронного электродвигателя в параметрической форме.
5. Преобразование уравнения механической характеристики асинхронного двигателя в параметрической форме к формуле Клосса.
6. Анализ механической характеристики 3-фазного АД.
7. Искусственные механические характеристики 3-фазного АД при изменении напряжения.
8. Искусственные характеристики при изменении активного и индуктивного сопротивлений в цепи обмотки статора АД
9. Искусственные механические характеристики 3-фазного АД при изменении напряжения и активного сопротивления в обмотках ротора.
10. Искусственные характеристики при введении активных и индуктивных сопротивлений в цепь обмотки ротора АД
11. Искусственные механические характеристики 3-фазного АД при изменении частоты тока, напряжения на зажимах обмотки статора и при $U/f = \text{const}$.
12. Способы уменьшения пусковых токов 3-фазных АД.
13. Тормозные режимы 3-фазных АД. Способы получения, область применения.
14. Расчет пусковых и тормозных сопротивлений 3-фазных АД с фазным ротором
15. Компьютерный метод расчета пусковых сопротивлений АД.
16. Механические характеристики АД при асимметрии напряжений.
17. Механические характеристики однофазных АД.
18. Использование 3-фазных АД в 1-фазном режиме.

1. Паспортные данные 3-фазных АД.

Каждый двигатель снабжается техническим паспортом в виде приклепанной металлической таблички, на которой приведены основные характеристики двигателя *Рис.1.* (АД.1)

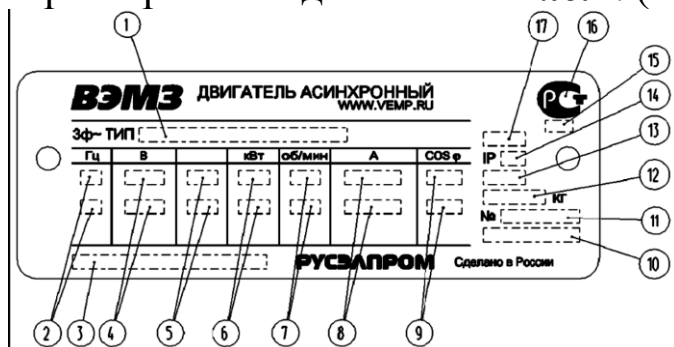


Рис. 75.1

1 – Наименование типа двигателя;

Тип двигателя состоит из следующих структурных элементов:

5А МХ 160 М 2 БП У3 или 5А Н 225 МА 6/24 НЛБ УХЛ4

1 2 3 4 5 6 7 1 2 3 4 5 6 7

1. Обозначение серии:

АИР, АИВ, 4А, 5А, 6А, и др.

2. Признак модификации:

М – модернизированные

П – пристраиваемый

Х – в алюминиевой станине

ЕУ – однофазные

С – повышенного скольжения

В – встраиваемые

Э – для транспорта

К – с фазным ротором

Ф – с принудительной вентиляцией

Н – с самовентиляцией

3. Габарит (высота оси вращения, мм):

80, 90, 112, 132, 160, 180, 200, 225, 250, 280, 315, 355, и др.

4. Условный установочный размер:

по длине станины (S, M, L) или условная длина пакета статора (А, В).

5. Число полюсов двигателя:

односкоростные - 2, 4, 6, 8, 10, 12;

многоскоростные - 2/4, 8/6/4 и т.д.

6. Признак отличия по назначению:

е – энергосберегающие

К – по нормам CENELEK

Б – с датчиком температурной защиты

Н – малошумные

П – повышенной точности по установочным размерам

Л – для лифтов

С – для станков качалок

Р – с роликовым подшипником (для повышенных радиальных нагрузок)

А (А1, А2, А3) – для АЭС

7. Климатическое исполнение и категория размещения:

(У1, У2, У3, Т2, УХЛ и т.д.) по ГОСТ 15150 – 69

Обозначение климатического исполнения	Категория размещения	Температура воздуха, °С	Относительная влажность при температуре
У (умеренный климат)	1,2	- 45 ... + 40	100 % при + 25 °С
	3		98 % при + 25 °С
ХЛ(холодный климат)	1,2	- 60 ... + 40	100 % при + 25 °С
УХЛ (умеренно-холодный климат)	1,2		
	4	+ 1 ... + 35	80 % при + 25 °С
Т (тропический климат)	2	- 10 ... + 50	100 % при + 35 °С
ОМ (морской климат)	2-5	- 30 ... + 45	75 % при + 40 °С 95 % при + 25 °С

Категория размещения двигателя (цифра в обозначении, после климатического исполнения) **1** – на открытом воздухе; **2** – под навесом при отсутствии прямого солнечного излучения и осадков; **3** – в закрытых помещениях без искусственного регулирования климатических условий; **4** – в закрытых помещениях с искусственно регулируемые климатическими условиями; **5** – в условиях повышенной влажности.

2 – Частота сети, Гц; 50 Гц; 60 Гц

3 – Обозначение нормативного документа;

4 – Номинальное напряжение, В:

220/380V — при соединении обмотки статора в треугольник она должна включаться на напряжение 220 В, а при соединении в звезду — на напряжение 380 В.

$$U_{\zeta} = \sqrt{3}U_{\delta}$$

5 – Схема соединения: треугольник или в звезда

6 – Номинальная мощность: $P_i = \sqrt{3}U_i I_i \cos \varphi_i \eta_i$

7 – Частота вращения, об/мин: Для перевода $\omega_i = \frac{\pi \cdot n_i}{30}$

8 – Номинальный ток, А;

Машины, работающая с номинальной нагрузкой, потребляет 13,6 А при включении на треугольник и 7,8 А — при включении на звезду;

9 – Коэффициент мощности;

КПД = 86,5% — номинальный коэффициент полезного действия двигателя, соответствующий номинальной нагрузке на его валу;

10 – дата выпуска двигателя (месяц и год);

11 – заводской номер двигателя; климатическое исполнение и др.);

Заводской N 100592 дает возможность отличить электрическую машину среди однотипных.

12 – масса двигателя, кг;

13 – класс изоляции;

В паспорте указан ГОСТ, класс изоляции обмотки (для класса В предельно допустимая температура 130°C), масса машины и год выпуска.

14 – степень защиты;

15 – код органа сертификации;

16 – знак соответствия Росстандарта;

17 – режим работы двигателя.

Например, если S1 — двигатель предназначен для длительного режима работы;

Расположение полей данных на паспортных табличках двигателей, выпущенных в разные годы, может варьироваться.

2. Построение естественной механической характеристики 3-фазного АД по паспортным и каталожным данным.

Электродвигатели 4А, 4АМ - основные технические характеристики

Марка двигателя		P_H , кВт	S_H , %	η_H , %	$\cos \varphi$	μ_K	μ_n	$\mu_{мин}$	i_n
Синхронная частота вращения 3000 об/мин									
4АА56А2 У3	4ААМ56А2	0,18	8	66	0,76	2,2	2	1,2	5
4АА56В2 У3	4ААМ56В2	0,25	8	68	0,77	2,2	2	1,2	5
4А63А2 У3	4АМ63А2	0,37	8,3	70	0,86	2,2	2	1,2	5
4А63В2 У3	4АМ63В2	0,55	8,5	73	0,86	2,2	2	1,2	5

	Наименование	М, Н.м	ω , рад/сек
1	Синхронная скорость	$M=0$	$\omega_o = \frac{2\pi f_1}{p}$
2	Номинальный момент	$M_H = \frac{P_H}{\omega_H}$	$\omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{30}$ $\omega_H = \omega_o \cdot (1 - s_H)$
3	Момент максимальный или критический	$M_K = \mu_K \cdot M_H$	$s_k = \frac{s_H \left[\mu_K + \sqrt{\mu_K^2 + 2s_H(\mu_K - 1)} - 1 \right]}{1 - 2s_H(\mu_K - 1)}$ $s_k = s_H \left(\mu_K + \sqrt{\mu_K^2 - 1} \right)$ более 15 кВт
4	Момент минимальный	$M_{min} = \mu_{min} \cdot M_H$	$\omega_{min} = \frac{\omega_o}{(7...8)}$
5	Момент пусковой	$M_n = \mu_n \cdot M_H$	$\omega = 0$

3. *Схема замещения 3-фазного АД. Параметры схемы замещения.*

Асинхронный двигатель по характеру протекающих в нем процессов и принципу работы представляет собою трансформатор. Для вывода уравнений механических и скоростных характеристик могут использоваться различные схемы замещения, применяемые в теории трансформаторов. Для асинхронных двигателей наиболее часто применяется упрощенная Г-образная схема замещения одной фазы.

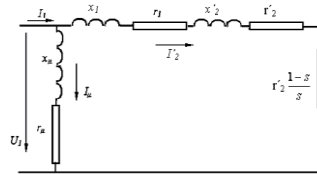


Рис.2 Схема замещения АД. (АД.8):

U_1 —первичное фазное напряжение;

I_1 —фазный ток статора;

I_2' —ток ротора, приведенный к обмотке статора;

I_μ — ток намагничивания;

x_1 —реактивное сопротивление обмотки статора;

x_2' —реактивное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора;

x_μ — реактивное сопротивление контура намагничивания;

r_1, r_2', r_μ —активные сопротивления обмоток соответственно статора, приведенное ротора и контура намагничивания;

При выводе уравнений принимается ряд допущений.

1. Активное сопротивление обмотки ротора не зависит от частоты тока в ней;
2. Насыщение магнитной системы не влияет на реактивные сопротивления обмоток ротора и статора;
3. Проводимость намагничивающего контура остается постоянной и зависит только от приложенного напряжения
4. Отсутствуют добавочные потери и высшие гармонические составляющие магнитодвижущих сил.

В отличие от трансформатора активная мощность двигателя расходуется на создание механической мощности на его валу. В схеме замещения асинхронного двигателя активная мощность, приходящаяся на одну фазу, выражается равноценным ей (эквивалентным) активным сопротивлением $r_2'(1-s)/s$.

Суммируя активное сопротивление обмотки ротора и эквивалентное сопротивление, получим активное сопротивление фазы ротора.

$$r_2' + r_2' \frac{1-s}{s} = \frac{r_2'}{s}. \quad (\text{АД.8})$$

4. Вывод уравнения механической характеристики 3-фазного АД в параметрической форме

Ток в обмотке статора складывается из приведенного тока ротора I'_2 и намагничивающего тока I_μ

$$I_1 = I_\mu + I'_2 \quad I'_2 \gg I_\mu \quad (\text{АД.9})$$

При постоянном напряжении на зажимах двигателя намагничивающий ток практически не зависит от нагрузки, поэтому в дальнейших расчетах он не учитывается, т.е. можно принять $I_1 \approx I'_2$.

Исходя из схемы замещения, можно записать выражение для приведенного тока ротора:

$$I'_2 = \frac{U_1}{z} \quad I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r'_2}{s}\right)^2 + (x_1 + x'_2)^2}} \quad I'_2 = \frac{U_1 s}{\sqrt{(r_1 s + r'_2)^2 + x_k^2 s^2}} \quad (\text{1.) доска!}$$

(АД.9)

где $x_k = x_1 + x'_2$ (АД.9) – индуктивное сопротивление двигателя при коротком замыкании.

Полученное выражение представляет собою уравнение скоростной (электромеханической) характеристики АД, т.к. выражает зависимость приведенного тока ротора от угловой скорости $s = \frac{\omega_o - \omega}{\omega_o}$.

Подведенная к обмоткам статора электрическая мощность P_1 частично теряется в сердечнике ΔP_c и в обмотках статора ΔP_{M1} , оставшаяся – электромагнитная мощность $P_{эм}$ через вращающееся электромагнитное поле передается в ротор двигателя, т.е.

$$P_1 = \Delta P_c + \Delta P_{M1} + P_{эм}, \quad (\text{АД.10})$$

При работе двигателя в режиме близком к номинальному частота тока в роторе весьма малы, потери в его сердечнике можно не учитывать. Следовательно, передаваемая в ротор электромагнитная мощность расходуется в активных сопротивлениях обмотки ротора и в сопротивлении, эквивалентном механической нагрузке. Эту мощность можно выразить как

$$P_{эм} = m I_2'^2 \frac{r'_2}{s}, \quad (\text{2.}) \quad (\text{АД.10})$$

где m – число фаз (для трехфазного двигателя m равно трем).

С другой стороны мощность, передаваемую в ротор, можно выразить через механические параметры: электромагнитный момент $M_{эм}$ и синхронную угловую скорость

$$P_{\text{эм}} = M_{\text{эм}} \omega_o . \quad (3.) \quad (\text{АД.10})$$

Приравняв между собою правые части (2.) и (3.), найдем электромагнитный момент:

$$M = \frac{P_{\text{эм}}}{\omega_o} = \frac{m}{\omega_o} I_2'^2 \frac{r_2'}{s} . \quad (4.) \quad (\text{АД.10})$$

Здесь и в дальнейшем индексы у момента двигателя опущены.

Подставим значение тока ротора из (1.) в выражение (4.), тогда

$$M = \frac{m}{\omega_o} \frac{U_1'^2 \frac{r_2'}{s}}{(r_1 + \frac{r_2'}{s})^2 + (x_1 + x_2')^2} * \frac{s^2}{s^2} \quad (\text{АД.11})$$

$$M = \frac{mU_1'^2 r_2' s}{\omega_o \left((r_1 s + r_2')^2 + x_k^2 s^2 \right)} \quad (5.) \text{ доска!!!!} \quad (\text{АД.11})$$

Полученное выражение представляет собою **уравнение механической характеристики двигателя**, в котором угловая скорость входит через скольжение; **уравнение называется параметрическим**, поскольку выражено через параметры обмоток статора и ротора.

5. Преобразование уравнения механической характеристики АД в параметрической форме к формуле Клосса.

Уравнение (5) представляет собою довольно сложную зависимость момента от скольжения, поэтому для выявления характера этой зависимости и обнаружения экстремумов необходимо взять первую производную этой функции по скольжению и приравнять к нулю.

$$\frac{dM}{ds} = \frac{mU_1'^2 r_2'}{\omega_o} \frac{[(r_1 s + r_2')^2 + x_k^2 s^2] - s[2r_1(r_1 s + r_2') + 2x_k^2 s]}{[(r_1 s + r_2')^2 + x_k^2 s^2]^2} = 0 \quad (\text{АД.11})$$

После преобразования числителя:

$$\frac{dM}{ds} = \frac{mU_1'^2 r_2'}{\omega_o} \frac{r_2' - r_1^2 s^2 - x_k^2 s^2}{[(r_1 s + r_2')^2 + x_k^2 s^2]^2} = 0 \quad (6.) \quad (\text{АД.11})$$

Производная (6) может быть равна нулю в том случае, когда **равен нулю числитель**, или **бесконечности знаменатель**. Второй вариант говорит о том, что **ротор** должен вращаться в сторону обратную направлению вращения магнитного поля с бесконечно большой скоростью, что практически не реально. Приравнивая нулю числитель, получим:

$$r_2' - r_1^2 s^2 - x_k^2 s^2 = 0, \quad (\text{АД.11})$$

откуда
$$s = \pm \frac{r_2'}{\sqrt{r_1'^2 + x_k'^2}} = s_k \quad (7) \text{ доска!!!!} \quad (АД.11)$$

Уравнение механической характеристики является функцией непрерывной. У этой функции имеет место два максимума при скольжении, которое принято называть критическим и обозначать символом s_k . Один из них при $s_{k\partial} > 0$ – в двигательном режиме, второй при $s_{k\epsilon} < 0$ – в генераторном режиме.

Если в уравнение механической характеристики (5.) подставить значение положительного критического скольжения из (7.), получим **максимальный или критический момент** для двигательного режима

$$M_{\partial\partial} = \frac{m}{\omega_o} \frac{U_1^2 r_2' \frac{r_2'}{\sqrt{r_1'^2 + x_k'^2}}}{\left(\frac{r_1 r_2'}{\sqrt{r_1'^2 + x_k'^2}} + r_2' \right)^2 + x_k'^2 \left(\frac{r_2'}{\sqrt{r_1'^2 + x_k'^2}} \right)^2} \quad (АД.12)$$

Проведя ряд алгебраических преобразований, получим:

$$M_{k\partial} = \frac{m}{2\omega_o} \frac{U_1^2}{\sqrt{\eta_1^2 + x_k^2} + \eta_1} \quad (8.) \quad (АД.12) \text{ доска!!!!}$$

Максимальный момент для генераторного режима имеет место при отрицательном критическом скольжении:

$$M_{k\epsilon} = -\frac{m}{2\omega_o} \frac{U_1^2}{\sqrt{\eta_1^2 + x_k^2} - \eta_1} \quad (9.) \quad (АД.12)$$

Сравнив уравнения (8.) и (9.) видно, что максимальный момент в генераторном режиме численно больше, чем в двигательном.

$$\frac{M_{k\epsilon}}{M_{k\partial}} = -\frac{\sqrt{\eta_1^2 + x_k^2} + \eta_1}{\sqrt{\eta_1^2 + x_k^2} - \eta_1} \quad (АД.13)$$

Разделим числитель и знаменатель на $\sqrt{r_1'^2 + x_k'^2}$, тогда

$$\frac{M_{k\epsilon}}{M_{k\partial}} = -\frac{1 + \frac{\eta_1}{\sqrt{r_1'^2 + x_k'^2}}}{1 - \frac{\eta_1}{\sqrt{r_1'^2 + x_k'^2}}} \quad \frac{M_{k\epsilon}}{M_{k\partial}} = \frac{1 + \epsilon}{1 - \epsilon} \quad (АД.13)$$

Умножив дроби числителя и знаменателя на отношение r_2' / r_2' , получим (с учетом $s = \pm \frac{r_2'}{\sqrt{r_1'^2 + x_k'^2}} = s_k$)

$$\varepsilon = \frac{r_1}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}} \frac{r_2'}{r_2'} = \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}} \frac{r_1}{r_2'} = \alpha s_k, \quad (\text{АД.14})$$

где $\alpha = \frac{r_1}{r_2'}$ – коэффициент сопротивлений.

Для упрощения расчетов без большой погрешности можно принять $\alpha \approx 1$, тогда $\varepsilon \approx s_k$.

Параметрическое уравнение механической характеристики имеет недостаток, что входящие в него параметры обмоток двигателя не всегда доступны, поэтому его преобразуют к более удобному для практического использования виду. С этой целью разделим уравнение ($M = \frac{m}{\omega_o} \frac{U_1^2 r_2' s}{(r_1 s + r_2')^2 + x_k^2 s^2}$) на выражение ($M_{\text{эв}} = \frac{m}{2\omega_i} \frac{U_1^2}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2} + r_1}$)

$$M = \frac{m}{\omega_o} \frac{U_1^2 r_2' s}{(r_1 s + r_2')^2 + x_k^2 s^2} \quad \left(M_{\text{эв}} = \frac{m}{2\omega_i} \frac{U_1^2}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2} + r_1} \right)$$

$$\frac{M}{M_{\text{э}}} = \frac{2U_1^2 m r_2' s \omega_o}{U_1^2 m \omega_o} \frac{\sqrt{r_1^2 + x_k^2} + r_1}{(r_1 s + r_2')^2 + x_k^2 s^2}. \quad (\text{АД.15})$$

Произведя алгебраические преобразования, с учетом ($s = \pm \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}} = s_k$) и ($\varepsilon = \frac{r_1}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}} \frac{r_2'}{r_1} = \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}} \frac{r_1}{r_2'} = \alpha s_k$) получим:

$$M = \frac{2M_{\text{э}}(1 + \alpha s_{\text{э}})}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2\alpha s_{\text{э}}} \quad (10) \quad \text{доска!!!} \quad (\text{АД.15})$$

Полученное уравнение так же представляет собою зависимость момента от скольжения, но в отличие от выражения ($M = \frac{m}{\omega_o} \frac{U_1^2 r_2' s}{(r_1 s + r_2')^2 + x_k^2 s^2}$), в него входят величины, легко определяемые из паспортных и каталожных данных электродвигателей. Это уравнение принято называть по имени его автора **уточненной формулой Клосса**.

У электродвигателей мощностью 20 и более кВт индуктивное сопротивление короткого замыкания значительно больше активного сопротивления обмотки статора, т.е. $x_k \gg r_1$, поэтому без большой погрешности можно принять $r_1=0$ и тогда формула **уточненная формула Клосса** становится более удобной для расчетов

$$M = \frac{2M_{\text{э}}}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}. \quad (11) \quad (\text{АД.15})$$

Это выражение носит название **упрощенной формулы Клосса**.

Критическое скольжение, входящее в выражения (10) и (11) можно найти из выражения (10), записав его для номинального режима и обо-

$$\text{значив } \frac{\dot{I}}{\dot{I}_i} \hat{e} = \mu_{\hat{e}} : \quad \mu_{\hat{e}} = \frac{\frac{s_i + s_k}{s_i} + 2as_k}{2(1 + as_k)} \quad (\text{АД.16})$$

Если учесть, что $\alpha = r_1/r_2' \approx 1$, то

$$\mu_{\hat{e}} = \frac{\frac{s_i + s_k}{s_i} + 2s_k}{2(1 + s_k)} \quad (\text{АД.16})$$

Решением этого выражения относительно s_k является:

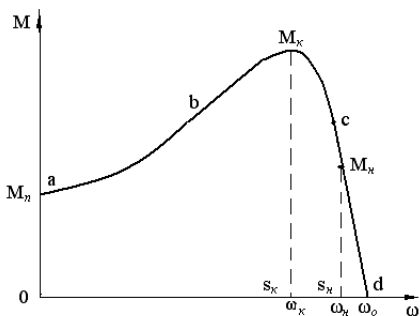
$$s_k = \frac{s_i \left[\mu_{\hat{e}} \pm \sqrt{\mu_{\hat{e}}^2 + 2s_i(\mu_{\hat{e}} - 1) - 1} \right]}{1 - 2s_i(\mu_{\hat{e}} - 1)} \quad (\text{12}) \quad (\text{АД.16})$$

Аналогично для упрощенной формулы Клосса из выражения следует:

$$s_k = s_i \left(\mu_{\hat{e}} \pm \sqrt{\mu_{\hat{e}}^2 - 1} \right) \quad (\text{13}) \quad (\text{АД.16})$$

Один из корней в последних двух выражениях имеет отрицательный знак. Он соответствует случаю, когда максимальный момент наступает при $s_H > s_k > 0$, что нереально, и это решение отпадает.

6 Анализ механической характеристики 3-фазного АД. Кратности пускового, максимального и минимального моментов. Определение критического скольжения.



В уравнениях механических характеристик

$$M = \frac{m}{\omega_o} \frac{U_1^2 r_2' s}{(r_1 s + r_2')^2 + x_k^2 s^2} \quad \text{и} \quad M = \frac{2M_{\hat{e}}(1 + as_{\hat{e}})}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} \quad (\text{АД.18})$$

зависимость момента электродвигателей от угловой скорости вала является сложной.

Для наглядности целесообразно принять некоторые упрощения и в упрощенной формуле Клосса и исследовать эту зависимость по частям.

1. На участке ab (рис. 3) уравнение механической характеристики находится в зоне малых и отрицательных скоростей, что соответствует скольжениям близким к единице, т.е. $s \geq 1$. У асинхронных двигателей общего назначения критическое скольжение $s_k = 0,12 \dots 0,15$. Из этого

следует, что второе слагаемое в знаменателе выражения $\left(\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} \right)$ зна-

$$M = \frac{2M_{\hat{e}}}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}$$

чительно меньше первого и им можно пренебречь. Тогда уравнение упрощается и принимает вид гиперболы: $M = \frac{2M_K}{s} s_k$ (АД.18)

2. Участок cd (рис. 3) это зона скоростей, близких к синхронной, когда $s \rightarrow 0$, отношение s/s_k становится сколь угодно малым и уравнение механической характеристики становится линейной функцией скольжения:

$$M = \frac{2M_K}{s_k} s \quad (\text{АД.18})$$

3. Между этими двумя участками (ab и cd) кривая совершает плавный переход при максимальном моменте M_K и критическом скольжении s_k . Точка максимального момента M_K делит механическую характеристику на две части. На участке от точки a до M_K – **ветвь разбега**, на участке от M_K до ω_o – **рабочая ветвь**.

На ветви от M_K до ω_o расположены параметры номинального режима работы двигателя: M_n и ω_n , она **обладает высокой жесткостью**: при изменении нагрузки от нуля до номинальной статическое падение скорости составляет **от 3 до 6 %** от синхронной скорости.

Нелинейность уравнений механических характеристик АД обусловлена процессами, которые происходят в обмотках и сердечниках при изменении скорости. Электромагнитный момент, развиваемый двигателем переменного тока, определяется выражением:

$$M = c\Phi I'_2 \cos\psi_2, \quad (\text{АД.18})$$

где c – конструктивная постоянная;

Φ – магнитный поток вращающегося магнитного поля;

I'_2 – ток в обмотках ротора, приведенный к статору;

ψ_2 – угол сдвига по фазе между током и э.д.с. в обмотке ротора.

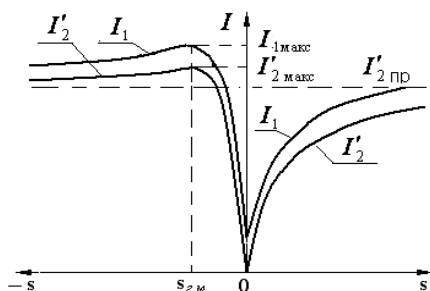


Рис 4 Скоростная характеристика АД. (АД.19)

В момент включения двигателя магнитное поле, создаваемое обмоткой статора, вращается с угловой скоростью ω_o в то время как скорость двигателя равна нулю. В обмотках ротора **наводится большая э.д.с.** частотой тока сети, при которой индуктивное сопротивление в них значительно превышает активное, что приводит к снижению коэффициента мощности в роторе. В тоже время пусковой ток ротора, в несколько раз превосходящий номинальный, создает свое магнитное поле, которое приводит к размагничиванию машины. Вследствие этих причин **КЗ АД** без дополнительных мер развивает сравнительно небольшой пусковой момент (**рис. 3**). **По мере увеличения скорости**, в роторе уменьшаются э.д.с., ток и частота тока. При этом $\cos\psi_2$ и результирующий магнитный поток увеличиваются быстрее, чем уменьшается ток, что обуславливает ($M = \tilde{n}\hat{O}I'_2 \cos\psi_2$) увеличение вращающего момента (участок *ab* на **рис.3**). В дальнейшем, начиная от скорости ω_k , ток ротора настолько быстро падает, что рост $\cos\psi_2$ и восстановление магнитного потока не компенсируют его уменьшения и вращающий момент двигателя быстро снижается вплоть до нуля при синхронной скорости.

На **рис. 4** приведены скоростные характеристики для токов ротора и статора АД.

Анализ уравнения скоростной характеристики ($I'_2 = \frac{U_1 s}{\sqrt{(r_1 s + r'_2)^2 + x_k^2 s^2}}$ (АД.20) показывает, что в двигательном режиме, при $|s| \rightarrow +\infty$, ток ротора монотонно возрастает и стремится к своему предельному значению

$$I'_{2np} = \frac{U_1}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}}. \quad (\text{АД.20})$$

При отрицательных скольжениях (генераторный режим) эта функция имеет максимум, равный $I'_{2max} = U_1/x_k$ при скольжении

$$s_{\bar{a}i} = -\frac{r'_2}{r_1} = -\frac{1}{a}. \quad (\text{АД.20})$$

Здесь a —коэффициент сопротивлений.

В области отрицательных скольжений при $s < s_{z.m.}$ ток ротора стремится к тому же предельному значению, но сверху. Следует отметить, что для двигателей малой мощности, у которых $a \approx 1$, ток достигает максимального значения при $s_{z.m.} \approx -1$, а для двигателей большой мощности, когда $a \rightarrow 0$, $s_{z.m.} \rightarrow -\infty$. В последнем случае режим максимального тока практически оказывается нереализованным. Вместе с тем как видно из **рис 4** при одинаковых значениях скольжения ток ротора в двигательном режиме всегда меньше тока ротора в генераторном режиме.

Ток ротора I'_2 является основной величиной для оценки режима работы двигателя. Поэтому также важной является задача построения зависимости $I_1(\omega)$ и $I'_2(\omega)$. Использование для этого уравнения ($I'_2 = \frac{U_1 s}{\sqrt{(r_1 s + r'_2)^2 + x_k^2 s^2}}$) **не всегда возможно ввиду отсутствия подробных данных** о сопротивлениях двигателя. В данном случае уравнение скоростной характеристики удобно выразить через параметры, применяемые для построения механических характеристик. Для этого, приравняв правые части уравнений ($M = \frac{m}{\omega_o} I_2'^2 \frac{r'_2}{s}$ и $M = \frac{2M_k(1+as_k)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2as_k}$) (АД.21), получим:

$$I'_2 = \sqrt{\frac{2M_k(1+\varepsilon)\omega_o s}{m(s/s_k + s_k/s + 2\varepsilon)r'_2}} \quad (\text{АД.21})$$

Или, применяя упрощенную формулу Клосса, можно записать

$$I'_2 = \sqrt{\frac{2M_\varepsilon \omega_o s}{m(s/s_k + s_k/s)r'_2}} \quad (\text{АД.21})$$

Для схемы замещения, принятой на **рис. 1** ток намагничивания I_μ сохраняется неизменным при всех режимах. С достаточной степенью точности его можно считать чисто реактивным, если пренебречь потерями мощности на перемагничивание сердечника статора. Величину этого тока можно определить из паспортных данных, как $I_\mu = I_n \sin \varphi_n$, где $\sin \varphi_i = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_i}$

Зная ток намагничивания и приведенный ток ротора, определяем ток статора:

$$I_1 = \sqrt{I_\mu^2 + I_2'^2(1+2\alpha)}. \quad (\text{14}) \quad (\text{АД.22})$$

Здесь $\alpha = I_\mu / I'_{2np}$, где I'_{2np} —предельный ток ротора (см. **рис. 4**)

У выпускаемых электродвигателей $\alpha = 0,115 \dots 0,13$, поэтому без большой погрешности выражение (14) можно записать как:

$$I_1 \approx \sqrt{I_\mu^2 + I_2'^2} \quad (\text{АД.22})$$

7. Искусственные механические характеристики 3-фазного АД при изменении напряжения.

Для получения искусственных характеристик асинхронного электродвигателя достаточно изменить хотя бы один из параметров, входящих в уравнение ($M = \frac{m}{\omega_o} \frac{U_1^2 r'_2 s}{(r_1 s + r'_2)^2 + x_k^2 s^2}$) (АД.23) (подводимое к обмотке статора напряжение, активные или индуктивные сопротивления в цепи обмоток статора или ротора, частоту тока, число пар полюсов).

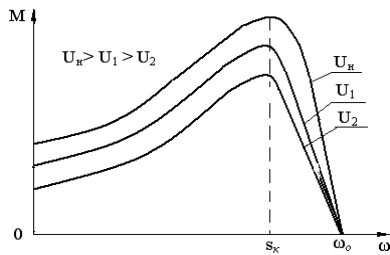
Как видно из уравнения ($M = \frac{m}{\omega_o} \frac{U_1^2 r_2' s}{(r_1 s + r_2')^2 + x_k'^2 s^2}$), момент, развиваемый

двигателем, пропорционален квадрату напряжения, т.е. $M = \hat{\epsilon} U_1^2$ (АД.23)

где κ — коэффициент, зависящий от параметров двигателя.

Из ($s = \frac{\omega_o - \omega}{\omega_o}$) и ($s = \pm \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + x_k'^2}} = s_k$) видно, что угловая скорость магнитного

поля и критическое скольжение не зависят от напряжения и механические характеристики при снижении напряжения приобретают вид, показанный на **рис. 5**



Все искусственные характеристики проходят через точку синхронной скорости (ω_o), а критический момент наступает при неизменном критическом скольжении. *Столь существенная зависимость моментов асинхронных двигателей от напряжения должна учитываться при проектировании электроприводов и условиях эксплуатации.* **Это особенно следует иметь в виду**

в условиях сельскохозяйственного электроснабжения, где мощности электродвигателей нередко бывают соизмеримы с мощностью источников питания, а питающие линии имеют большую протяженность. Поэтому при выборе двигателей их необходимо проверять по условиям запуска с учетом возможного падения напряжения, а ранее включенные двигатели проверять на перегрузочную способность.

8 Искусственные характеристики при изменении активного и индуктивного сопротивлений в цепи обмотки статора АД

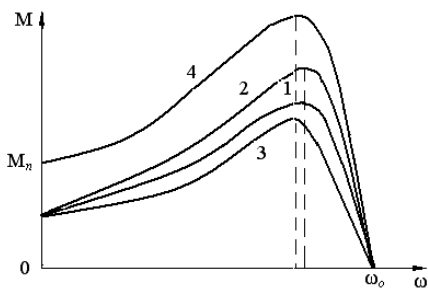


Рис. 6 Механическая характеристика АД при включение в цепь статора: 1 – активного сопротивления; 2 – индуктивного сопротивления; 3 – снижение напряжения; 4 – естественная характеристика.

По мере разбега ток и падение напряжения на добавочных сопротивлениях уменьшаются, а на зажимах двигателя напряжение увеличивается.

Из уравнения $(M = \frac{m}{\omega_o} \frac{U_1^2 r_2' s}{(r_1 s + r_2')^2 + x_k^2 s^2})$ видно, что введение добавоч-

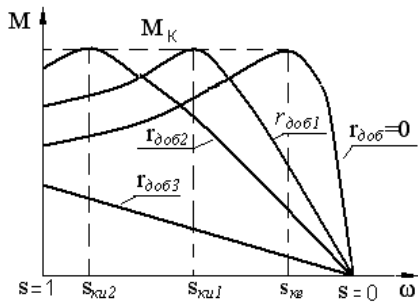
ных активного и индуктивного сопротивлений при пуске оказывает большее влияние, чем при критическом скольжении, когда значительно уменьшившийся ток приведет к меньшему падению напряжения на этих сопротивлениях. Это объясняется тем, что при одинаковом уменьшении пускового момента от введения сопротивлений и от снижения напряжения, критический момент в случае с сопротивлениями снижается в меньшей степени (кривые 1 и 2 на **рис. 6**), чем в случае с понижением напряжения (кривая 3). Как видно на **рис. 6** влияние активного сопротивления на величину максимального момента больше, чем индуктивного. Это связано с тем, что в знаменателе выражения ($M_{\text{эа}} = \frac{m}{2\omega_i} \frac{U_1^2}{\sqrt{r_1^2 + x_e^2} + r_1}$) активное сопротивление входит дважды, тогда как индуктивное один раз.

При введении активных и индуктивных сопротивлений в цепь обмотки статора критическое скольжение, как следует из $(s = \pm \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}} = s_k)$, не-

сколько уменьшается. Угловая скорость магнитного поля от сопротивления обмоток статора не зависит.

9. Искусственные механические характеристики 3-фазного АД при изменении напряжения и активного сопротивления в обмотках ротора.

Из выражений ($s = \frac{\omega_o - \omega}{\omega_o}$) и ($M_{ei} = \frac{m}{2\omega_i} \frac{U_1^2}{\sqrt{r_1^2 + x_e^2} + r_1}$) видно, что при увели-



чению активного сопротивления в роторе максимальный момент и синхронная угловая скорость остаются неизменными. Критическое скольжение, как следует из ($s_k = \pm \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}}$) увеличивается с ростом активного сопротивления (рис. 7).

Рис 7 Механические характеристики АД при изменении активного сопротивления ротора

При увеличении активного сопротивления в обмотке ротора ($r_{доб.2} > r_{доб.1} > 0$ и $s_{ku.2} > s_{ku.1} > s_k$), критический момент смещается в сторону меньших скоростей, оставаясь неизменным по величине. Это объясняется тем, что вначале с увеличением активного сопротивления в роторе увеличивается коэффициент мощности и растет пусковой момент. Это продолжается до наступления равенства, при котором критическое скольжение становится **равным единице**, а пусковой момент двигателя максимальному.

$$s_k = \pm \frac{r_2' + r'_{\dot{a}\dot{a}}}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}} = 1 \quad r_2' + r'_{\dot{a}\dot{a}} = \sqrt{r_1^2 + x_k^2} \quad (\text{АД.26})$$

Дальнейшее увеличение активного сопротивления в роторе приводит к быстрому снижению пускового тока и пускового момента (характеристика при $r_{доб.3}$ на рис. 7). При этом наклон рабочей ветви механических характеристик увеличивается, а их жесткость снижается.

Изменению активного сопротивления ротора широко используются на практике. Это позволяет уменьшать пусковые токи, запускать двигатели при максимальном моменте, регулировать угловую скорость при неизменной перегрузочной способности, осуществлять торможение противовключением при допустимых токах. Для реализации этих возможностей трехфазная обмотка ротора выполняется изолированным проводом в виде катушек по аналогии с обмоткой статора, соединяется по схеме звезда, три конца которой выводятся на контактные кольца, установленные на валу двигателя. Такие двигатели называются двигателями с фазным ротором или с контактными кольцами.

10 Искусственные характеристики при введении активных и индуктивных сопротивлений в цепь обмотки ротора АД.

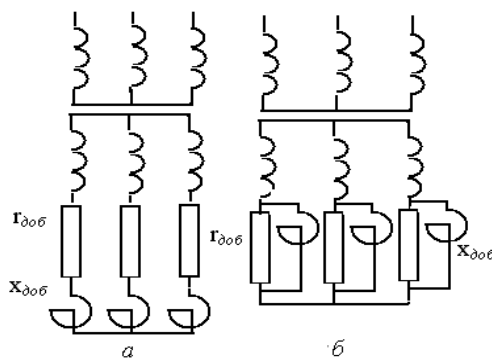


Рис 8 Схема последовательного (а) и параллельного (б) включения добавочных активного и индуктивного сопротивлений в цепь ротора.

Индуктивное сопротивление, **вводимое в цепь ротора**, изменяется с изменением скорости вала двигателя: в момент пуска двигателя частота тока в роторе равна частоте тока сети и индуктивное сопротивление ротора велико.

Из уравнения **скоростной** характеристики ($I_2' = \frac{U_1 s}{\sqrt{(r_1 s + r_2')^2 + x_k^2 s^2}}$ (АД28.),

увеличение индуктивного сопротивления в цепи ротора приводит к уменьшению пускового тока, пускового и максимального моментов ($M = \frac{m}{\omega_o} \frac{U_1^2 r_2' s}{(r_1 s + r_2')^2 + x_k^2 s^2}$, ($M_{\dot{a}i} = \frac{m}{2\omega_i} \frac{U_1^2}{\sqrt{r_1^2 + x_e^2 + r_1}}$ (АД28.) и увеличению угла сдвига по фазе между током и э.д.с. ротора.

По мере **нарастания скорости** ток, э.д.с., частота тока в роторе и индуктивное сопротивление реактора падают, но ток уменьшается с меньшей интенсивностью, чем при добавочном активном сопротивлении. **Уменьшение индуктивного** сопротивления ротора способствует более быстрому росту $\cos\psi_2$, поэтому на ветви разбега интенсивность увеличения момента такая же как и на естественной характеристике.

При необходимости поддержания постоянства пускового момента двигателя в цепь ротора, кроме индуктивного сопротивления, вводят еще и активное сопротивление. Оно может быть включено последовательно (рис. 8, а) или параллельно (рис. 8, б) с ротором.

При последовательном включении из-за большой частоты тока в роторе в момент пуска и большого суммарного сопротивления пусковой ток относительно мал, но, благодаря добавочному активному сопротивлению, увеличивается $\cos\phi_2$ и пусковой момент оказывается больше, чем при одной индуктивности (кривая 3 на рис. 9).

При параллельном соединении индуктивного и активного сопротивлений в цепи ротора по мере разгона двигателя происходит перерас-

пределение токов в параллельных ветвях. В момент пуска основная часть тока идет по активному сопротивлению, так как индуктивное сопротивление реактора относительно велико. В процессе разгона двигателя частота тока в **реакторе** снижается, индуктивное сопротивление уменьшается и по нему начинает протекать большая часть тока. В результате переменных соотношений между активными и реактивными сопротивлениями удастся получить искусственные механические характеристики при почти постоянном моменте двигателя в период пуска (кривая 2 на **рис. 10**).

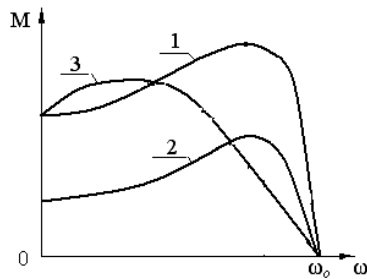


Рис. 9 Механическая характеристика асинхронного двигателя: 1. – естественная; 2 – при включение (индуктивного) реактора; 3 – активного сопротивления последовательного с индуктивностью

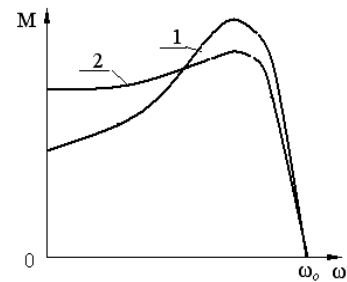


Рис. 10 Механическая характеристика АД: 1 – естественная; 2 – при параллельном включение активного сопротивления с индуктивностью.

11. Искусственные механические характеристики 3-фазного АД при изменении частоты тока, напряжения на зажимах обмотки статора и при $U/f = \text{const}$.

Искусственные характеристики при изменении частоты тока сети

Основные выражения, характеризующие работу АД такие как уравнение механической характеристики ($M = \frac{m}{\omega_o} \frac{U_1^2 r_2' s}{(r_1 s + r_2')^2 + x_k^2 s^2}$, формулы максимального момента $M_{\text{э}a} = \frac{m}{2\omega_i} \frac{U_1^2}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2} + r_1}$, критического скольжения $s = \pm \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}} = s_k$, синхронной скорости $s = \frac{\omega_o - \omega}{\omega_o}$ (АД31).

Эти выражения содержат параметры, зависящие от частоты тока, поэтому ее влияние на механические характеристики очевидно. Известно, у АД индуктивное сопротивление короткого замыкания значительно больше активного сопротивления обмотки статора, ($x_k \gg r_1$), поэтому с целью упрощения дальнейших выкладок без большой погрешности активным сопротивлением можно пренебречь, т.е. принять $r_1 \approx 0$. Тогда выражение ($M_{\text{э}a} = \frac{m}{2\omega_i} \frac{U_1^2}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2} + r_1}$) при стандартной частоте, можно записать

как:
$$M_{\text{э}n\delta} = \frac{m}{2\omega_{i\ n\delta}} \frac{U_1^2}{x_{k\ n\delta}} \quad (15) \quad (\text{АД31.})$$

$M_{\text{к} \text{ст}}$ – критический момент двигателя при стандартной частоте тока сети; $\omega_{o \text{ст}}$ и $x_{k \text{ст}}$ – синхронная скорость и сопротивление короткого замыкания при стандартной частоте.

При изменении частоты тока ее можно выразить как $f_1 = f_{\text{n}\delta} \cdot \varphi$ (АД.32), а синхронную скорость и сопротивление короткого замыкания через стандартную и относительную частоту:

$$\omega_i = \frac{2\pi f_{\text{n}\delta} \varphi}{p} = \omega_{i\ \text{n}\delta} \varphi \quad \text{и} \quad x_k = 2\pi f_{\text{n}\delta} \varphi L_k = \tilde{\omega}_{k\ \text{n}\delta} \varphi \quad (\text{АД.32})$$

L_k – коэффициент самоиндукции.

Подставив значения этих параметров в (15), получим выражение для критического момента при изменении частоты тока:

$$M_{\text{э}} = \frac{m}{2\omega_{o\ \text{n}\delta}} \cdot \frac{U_1^2}{x_{k\ \text{n}\delta} \varphi^2} \quad (16) \quad \text{а, сравнив с (15) можно записать: } \dot{\lambda}_{\text{э}} = \frac{\dot{\lambda}_{\text{э}\ \text{n}\delta}}{\varphi^2} \quad (\text{АД.33})$$

Из этого выражения следует, что **критический момент обратно пропорционален квадрату частоты тока.**

Жесткость рабочей ветви механической характеристики двигателя при снижении частоты возрастает, поскольку разность между синхронной и критической угловой скоростью от частоты тока не зависит. Это следует, что $s_k \omega_o = \omega_o - \omega_k = \text{const}$ или $\frac{s_{\text{э}\ \text{n}\delta}}{\varphi} \omega_{i\ \text{n}\delta} \varphi = \omega_i - \omega_{\text{э}} = \text{const}$ (АД.33)

Характеристики при относительных частотах $\varphi=0,5, 1$ и 2 приведены на **рис. 11 (АД.34)**.

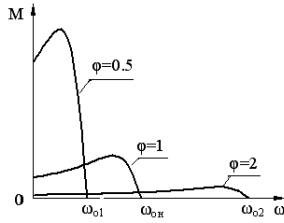


Рис. 11 Механические характеристики АД при изменении частоты тока сети (АД.34)

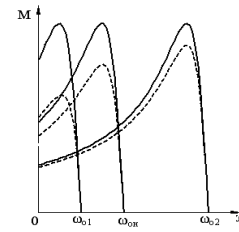


Рис. 12 Мех. характеристики АД при изменении частоты тока сети и напряжения (АД.35)

Из (16) и видно на **рис. 11**. перегрузочная способность и пусковой моменты двигателя сильно падают при увеличении частоты тока, что является большим недостатком этих искусственных характеристик.

С практической точки зрения частотного регулирования скорости асинхронных двигателей представляют большой интерес искусственные характеристики при одновременном регулировании частоты тока и напряжения, подводимого к обмоткам статора, по закону $U/f=const.$ (АД.35), т.е. пропорциональном изменении этих параметров. Если при учесть, что критический момент АД пропорционален квадрату напряжения, то при изменении напряжения и частоты выражение (16) можно записать как:

$$M_{\dot{\epsilon}} = \frac{m}{2\omega_{o\dot{n}\dot{o}}} \cdot \frac{U_{1\dot{n}\dot{o}}^2 u^2}{x_{k\dot{n}\dot{o}} \varphi^2} = \dot{I}_{\dot{\epsilon}\dot{n}\dot{o}} \quad (17) \quad (106)$$

Поскольку по условию изменения напряжения и частоты одинаковы, в выражении (17) $\varphi=u$ и, следовательно, критический момент остается неизменным. Механические характеристики, построенные по уравнению (17) для относительных частот и напряжений $\varphi=u= 0,5, 1$ и 2 , показаны на рис. 39 сплошными линиями. Они показывают, что максимальный момент двигателя при всех частотах остается неизменным. Реально активное сопротивление обмоток статора не равно нулю и, как показано на рис. **Рис. 12 (АД.36)** штриховыми линиями критический и пусковой моменты с понижением частоты тока и напряжения несколько уменьшаются.

Искусственные механические характеристики двигателя при частотах тока и напряжении, отличных от номинальной, можно построить по уравнениям Клосса, пересчитав соответственно величины максимального момента и критического скольжения по формулам (АД.37):

$$M = \frac{2M_{\dot{\epsilon}}(1+as_{\dot{\epsilon}})}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2as_{\dot{\epsilon}}} \quad M = \frac{2M_{\dot{\epsilon}}}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} \quad \dot{I}_{\dot{\epsilon}} = \frac{\dot{I}_{\dot{\epsilon}\dot{n}\dot{o}}}{\varphi^2} \quad M = \dot{\epsilon}U_i^2 u^2 \quad s_k = \frac{s_{k\dot{n}\dot{o}}}{\varphi} \quad M = \frac{2 \cdot M_{\dot{\epsilon}i} \cdot \frac{u^2}{\varphi^2} \cdot \left(1 + \frac{\epsilon_i}{\varphi}\right)}{\frac{s \cdot \varphi}{s_{ki}} + \frac{s_{ki}}{s \cdot \varphi} + 2 \cdot \frac{\epsilon_i}{\varphi}}$$

12. Способы уменьшения пусковых токов 3-фазных АД.

Одним из важнейших параметров электродвигателей всех типов, в том числе и асинхронных является величина пускового момента, призванного обеспечивать надежный пуск рабочих машин с нагрузкой. У двигателей с фазным ротором увеличение пускового момента достигается за счет введения в цепь ротора добавочных активных сопротивлений, позволяющих получать пусковой момент, равным критическому. У двигателей с короткозамкнутым ротором для увеличения пускового момента используется тот же прием – увеличение активного сопротивления обмотки ротора при пуске, но достигается за счет придания пазу определенной формы и использования явления вытеснения тока.



Для этого паз выполняется либо в виде глубокой узкой щели (рис. 13,а, двигатель с глубоким пазом), либо в виде двух, расположенных один под другим, пазов (рис. 13,б, АД с двойной беличьей клеткой). В момент пуска, когда по стержням обмотки ротора протекает повышенный пусковой ток с частотой тока сети, магнитный поток, создаваемый током стержня, концентрируется, главным образом, вокруг нижней части паза, т.к. здесь сопротивление магнитным силовым линиям меньше, чем в верхней части паза, где участок с неферромагнитной средой больше. В результате в нижней части паза образуется большое индуктивное сопротивление и ток вытесняется к верхней части, что фактически означает уменьшение сечения стержня следовательно, к увеличению его активного сопротивления. Аналогичные явления происходят и в роторе с двойной беличьей клеткой (рис. 13, б). В дальнейшем, с нарастанием скорости ротора уменьшаются ток, частота тока и индуктивное сопротивление нижней части стержня.

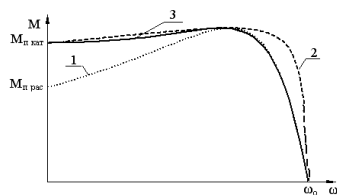


Рис. 14 Механические характеристики АД: 1 – естественная, 2 – скорректированная выражением (2.57), скорректированная выражением (2.59).

Ток распределяется равномерно по всему сечению стержня, что равнозначно уменьшению его активного сопротивления и при скольжении, близком к критическому АД выходит на естественную механическую характеристику. Варьируя формой паза и сплавами, из которых изготавливаются стержни, получают двигатели с пусковыми моментами, отвечающими требованиям ГОСТ.

Уравнения параметрической механической характеристики и Клосса на ветви разбега дают зависимость момента от скорости, пред-

ставленную кривой 1 на **рис. 14**, согласно которой расчетный пусковой момент $M_{n,рас}$ далеко не совпадает с фактическим $M_{n,фак}$. Для двигателей с глубоким пазом и двойной беличьей клеткой не существует строго выведенных уравнений, отражающих действительное протекание механических характеристик. Вместе с тем при решении различных задач динамики, переходных процессов, определения потерь и т.д. требуются уравнения, максимально отражающие реальные процессы. С этой целью некоторые авторы рекомендуют использовать искусственно подобранные уравнения механических характеристик. Одним из них является уравнение типа

$$M = \frac{2M_{\varepsilon}(1 + \varepsilon')}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2\varepsilon'} \quad (18) \quad (АД.40)$$

Коэффициент ε' можно определить из (18), решив его относительно ε' , в котором пусковой момент следует принять равным каталожному ($M_i = \mu_i \cdot M_i$), приняв $s=1$, тогда

$$\varepsilon' = \frac{\frac{1}{s_k} + s_k - 2\lambda}{2(\lambda - 1)}, \quad (19) \quad (АД.40)$$

где $\lambda = \mu_k / \mu_n$ – отношение кратности максимального момента к кратности пускового момента.

Механическая характеристика, построенная по уравнению (18) с учетом (19), представлена кривой 2 на **рис. 14**.

Такая корректировка позволяет получить уравнение механической характеристики с пусковым моментом, равным каталожному и ветвью разбега близкой к реальной. Однако рабочая ветвь при этом сильно деформируется.

У асинхронных двигателей с глубоким пазом и двойной беличьей клеткой увеличение пускового момента достигается за счет эффекта вытеснения тока в стержнях и увеличения активного сопротивления стержней при низких скоростях. Поэтому логично в параметрическое уравнение механической характеристики ввести дополнительный параметр в виде активного сопротивления, определенным образом изменяющегося в зависимости от скольжения. Такое уравнение имеет вид:

$$M = \frac{m}{\omega_o} \frac{U_1^2 s (r_2' + R s^2)}{(r_1 s + r_2' + R s^2)^2 + x_k^2 s^2} \quad (19) \quad (АД.40)$$

Здесь R – некоторое активное сопротивление, величину которого легко определить из выражения (19), подставив в него пусковой момент по каталогу при скольжении, равном единице, т.е. ($M = M_{n,кат}$, и $s=1$). График механической характеристики, построенный по уравнению (19), представлен сплошной линией 3 на **рис. 14**. Из графиков **рис. 41** видно, что это уравнение более полно отражает реальную механическую характеристику двигателя как на ветви разбега так и на его рабочей ветви.

13 Тормозные режимы 3-фазных АД. Способы получения, область применения

АД, как и двигатели постоянного тока, могут работать в тормозных режимах: генераторном с отдачей электроэнергии в сеть, динамическом с отдачей электроэнергии автономному потребителю и противовключения.

Генераторный тормозной режим с отдачей энергии в сеть

При вращении ротора с угловой скоростью меньше скорости вращающегося магнитного поля в его обмотках наводится э.д.с. и протекает ток такого направления, при котором в воздушном зазоре возникает электромагнитный момент, направленный в сторону вращения магнитного поля и ротора. Это соответствует двигательному режиму работы, когда подведенная к двигателю электрическая энергия преобразуется в механическую, используемую для приведения в движение рабочих органов.

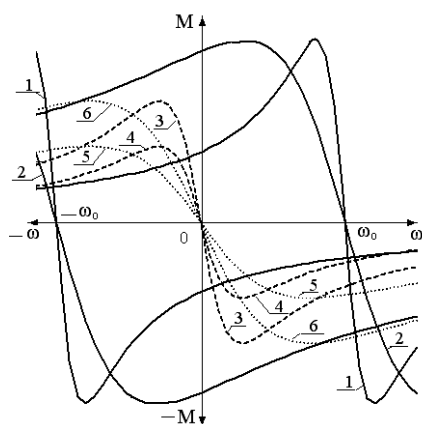


Рис 15 Механические характеристики тормозных режимов АД: 1 и 2 генераторный с отдачей эл. энергии в сеть, 3 и 4 динамический

Механические характеристики этого режима показаны на рисунке (АД.41) сплошными линиями в диапазоне угловой скорости от 0 до $+\omega_0$ для прямого вращения и от 0 до $-\omega_0$ для обратного вращения (кривые 1 и 2). При вращении ротора со скоростью магнитного поля (синхронная скорость) э.д.с. и ток в роторе отсутствуют и момент двигателя равен нулю — режим идеального холостого хода.

При подведении к валу двигателя дополнительной механической энергии ротор начинает вращаться со скоростью выше синхронной, э.д.с. и ток в роторе изменяют свое направление. Изменение направления тока в роторе приводит к изменению направления электромагнитного момента — он становится тормозным. Механическая энергия вращения ротора преобразуется в электрическую и отдается в сеть. Характеристики естественная 1 и реостатная 2 этого режима являются продолжением соответствующих характеристик двигательного режима при угловых скоростях, превышающих синхронные. Режим генераторного торможения с отдачей энергии в сеть применяется для ограничения скорости при спуске грузов на подъемных механизмах, на тормозных стендах для горячей обкатки двигателей внутреннего сгорания, для затормаживания двигателей при переходе с высшей скорости на низшую при переключении числа пар полюсов. Метод достаточно экономичный, т. к. энергия торможения не расходуется на нагрев сопротивлений, а отдается в сеть.

Режим динамического торможения

1. Динамический тормозной режим получают путем отключения обмоток статора от сети переменного тока и подключения их по определенным схемам к источнику постоянного тока. В этом случае торможение происходит по схеме независимого возбуждения.

2. Динамическое торможение возможно также по схеме самовозбуждения, когда обмотки статора после отключения их от источника трехфазного тока, подключаются к батарее конденсаторов.

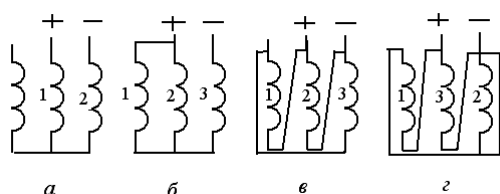


Рис. 16 Схемы включения обмоток статора АД при динамическом торможении (АД.42)

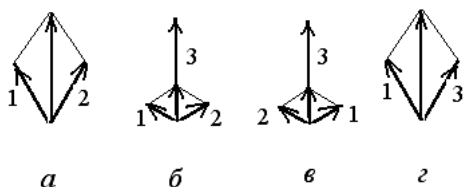


Рис 17 Векторные диаграммы намагничивающих сил для схем динамического торможения (АД.42)

татора служит сопротивление обмотки ротора, а в случае двигателя с фазным ротором – сопротивления ротора и внешнего резистора.

Механические характеристики динамического тормозного режима можно рассматривать, как искусственные характеристики при частоте тока питающей сети, равной нулю. Как видно из **рис. 15**, при уменьшении частоты тока искусственные характеристики смещаются в сторону уменьшения угловой скорости и, при частоте, равной нулю (постоянный ток), они проходят через начало осей координат. На **рис. 15** эти характеристики представлены кривыми 3,4 при прямом вращении и 5,6 при обратном вращении.

Основные схемы подключения обмоток статора АД к источнику постоянного тока в режиме динамического торможения показаны на **рис. 16**. Следует иметь в виду, что обмотки статора при постоянном токе обладают только активным сопротивлением. Чтобы не допустить в них слишком больших токов, напряжение постоянного тока должно быть пониженным по сравнению с номинальным напряжением двигательного режима.

При протекании постоянного тока по обмоткам статора, создаваемая им результирующая намагничивающая сила, зависит от величины тока и схемы соединения обмоток. На **рис. 16** показаны векторы МДС,

В режиме динамического торможения с **независимым возбуждением** постоянный ток, протекая по обмоткам статора, создает постоянное неподвижное в пространстве магнитное поле. При вращении ротора в его обмотке наводится э.д.с. и протекает ток. Взаимодействие тока ротора с магнитным полем статора создает тормозной момент. Нагрузкой такого генератора

соответствующие номерам фаз (16), и их пространственные сдвиги. Так для схемы, представленной на рис. 16, а, магнитодвижущие силы катушек сдвинуты между собою в пространстве на угол 60 градусов. Пользуясь векторной диаграммой м.д.с. для этой схемы, запишем зависимость результирующей м.д.с. от величины постоянного тока

$$F_i = 2I_i \omega_1 \cos 30^\circ = 2I_i \omega_1 \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} I_i \omega_1 \quad (\text{АД.43})$$

Согласно теории вращающегося магнитного поля, такая же м.д.с., может быть создана трехфазным переменным током I_1 ,

$$F_{\approx} = \frac{3}{2} \sqrt{2} I_1 \omega_1 \quad (\text{АД.43})$$

Исходя из равенства $F_n = F_{\approx}$, определяем значение постоянного тока, эквивалентного переменному:

$$\sqrt{3} I_i \omega_1 = \frac{3}{2} \sqrt{2} I_1 \omega_1 \quad \text{отсюда} \quad I_i \approx 1,23 I_1 \quad (\text{АД.43})$$

Следовательно, в этих условиях постоянный ток I_n должен быть больше переменного I_1 на 23% .

На рис.17 а, б , в и г представлены векторные диаграммы для схем рис. 16; им соответствуют значения эквивалентного постоянного тока: $I_n = 1,23 I_1$, $I_n = 1,41 I_1$, $I_n = 2,12 I_1$ и $I_n = 2,45 I_1$.

Электромагнитный момент, развиваемый двигателем в режиме динамического торможения, определяется потерями вторичного контура и, следовательно, может быть выражен равенством:

$$M = \frac{m_1 I_2'^2 \frac{r_2'}{v}}{\omega_o} = \frac{m_1 I_1^2 x_\mu r_2' v}{\omega_o [r_2'^2 + (x_\mu + x_2')^2 v^2]} \quad (20) \quad (\text{АД.44})$$

$$\text{где} \quad I_2' = \frac{I_1 x_\mu v}{\sqrt{r_2'^2 + (x_\mu + x_2')^2 v^2}} \quad (\text{АД.44}) \quad \text{— приведенный ток ротора;}$$

x_μ —индуктивное сопротивление намагничивающего контура статора;
 $v = \omega / \omega_o$ —относительная скорость ротора.

Выражение показывает, что электромагнитный момент при динамическом торможении определяется переменным током I_1 , эквивалентным постоянному току, протекающему по обмотке статора, и является функцией относительной скорости ротора.

Исследуя выражение (20) на экстремум, найдем, что критический момент в этом режиме M_k наступает при относительной скорости:

$$v_k = \frac{r_2'}{x_\mu + x_2'} \quad (21) \quad (\text{АД.44})$$

Если в уравнение (20) подставить значение критической скорости из (21), получим выражение критического момента для режима динамического торможения:
$$M_{\epsilon} = \frac{mI_1^2 x_{\mu}^2}{2\omega_o(x_{\mu} + x_2')^2}. \quad (\text{АД.44})$$

После деления левой и правой частей уравнения (20) на полученное выражение критического момента, уравнение механической характеристики приобретает вид:
$$M = \frac{2M_{\epsilon}}{\frac{v}{v_k} + \frac{v_k}{v}}. \quad (\text{АД.44})$$

Механические характеристики динамического тормозного режима для различных значений сопротивления ротора и тока статора представлены на рис. 15. Кривые 3 и 4 соответствуют одинаковому сопротивлению ротора и различным значениям постоянного тока в обмотке статора (кривая 3 для большего тока); кривые 5 и 6 при тех же значениях постоянного тока, но при большем сопротивлении цепи ротора. Динамический тормозной режим находит весьма широкое применение в электроприводах различного назначения. Это устройства для быстрого затормаживания механизмов в металлообрабатывающих станках, для остановки кабин в бытовых лифтах и шахтных подъемниках и т.п.

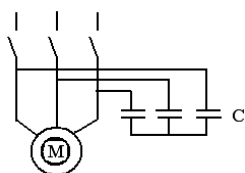


Рис 18 Схема включения АД при динамическом торможении с самовозбуждением (АД.45)

Режим динамического торможения с самовозбуждением осуществляется путем отключения обмотки статора от сети трехфазного тока и замыкания ее на батарею конденсаторов (рис.18). При вращении ротора, благодаря остаточной намагниченности сердечников, в обмотках статора наводится первоначальная незначительная э.д.с., вызывающая протекание опережающего емкостного тока, который усиливает магнитный поток. Это приводит к дальнейшему нарастанию тока в обмотках статора и усилению магнитного потока до полного возбуждения двигателя, обусловленного кривой намагничивания сердечников, емкостью конденсаторов и сопротивлением намагничивающего контура.

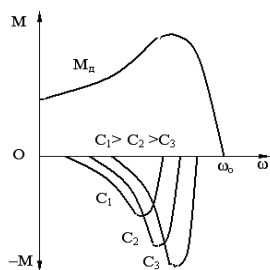


Рис 19 Механические характеристики при динамическом торможении с самовозбуждением (АД.46)

Установившийся магнитный поток способствует наведению э.д.с. в обмотках ротора и протеканию по ним тока. Двигатель работает, как асинхронный генератор с самовозбуждением, в котором генерируемая электрическая энергия выделяется в виде тепла в роторной цепи. Механические характеристики этого тормозного режима для различных значений

емкости приведены на **рис. 19**.

Такой динамический тормозной режим не находит широкого применения по причине того, что двигатель развивает тормозной момент на сравнительно узком диапазоне скорости: он возникает при скорости около половины синхронной, а его срыв происходит задолго до достижения полной остановки двигателя. А для получения необходимого тормозного момента при низких скоростях требуется большая емкость дорогостоящих конденсаторов.

Торможение противовключением

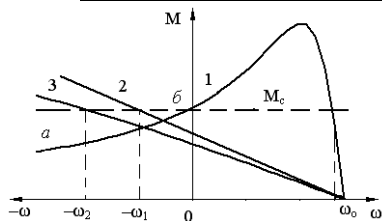


Рис. 20 Механическая характеристика торможения противовключением (АД.47)

Тормозной режим противовключением наступает в том случае, когда ротор принудительно приводится во вращение в сторону, противоположную включению двигателя, т.е. против направления вращения магнитного поля статора. АД с КЗ ротором в

режиме противовключения работает на участке *аб* (кривая 1 на **рис. 20**) неустойчивой ветви механической характеристики и его работа сопровождается протеканием по обмоткам статора и ротора больших токов. У АД с фазным ротором такой режим может осуществляться на рабочей ветви механической характеристики, если в цепь ротора вводить активные сопротивления, обеспечив соответствующий наклон рабочей ветви (кривые 2 и 3 на **рис.20**) Так, при нагрузке моментом сопротивления M_c (например момент, создаваемый подвешенным грузом на барабане лебедки), равновесие моментов наступает при отрицательной скорости ротора. Меняя величину активного сопротивления, можно изменять скорость при спуске груза ($-\omega_1, -\omega_2$ и т.д.). Тормозные режимы противовключением могут быть реализованы двумя методами: методом реверсирования и методом тормозного спуска. В первом случае при вращении ротора в одном направлении производят быстрое изменение чередования фаз обмотки статора. Скорость ротора в момент переключения остается прежней, двигатель переходит на механическую характеристику обратного вращения; развивая тормозной момент до полной остановки ротора. Такое торможение является весьма жестким, сопровождается большими токами в обмотках, динамическими ударами в передаточных механизмах, большими потерями энергии. Практически может применяться в электроприводах небольшой мощности при сравнительно легких инерционных массах.

Тормозные режимы противовключением на рабочей ветви механической характеристики двигателей с фазным ротором широко используются в приводах подъемно-транспортных механизмов при спуске грузов. Поэтому режим иногда называют режимом тормозного спуска.

14. Расчет пусковых и тормозных сопротивлений 3-фазных АД.

С целью увеличения пускового момента и уменьшения пускового тока при пуске АД с фазным ротором в цепь обмотки ротора включаются добавочные активные сопротивления.

Расчет пусковых сопротивлений графическим методом выполняется по аналогии с методикой, применяемой для двигателей постоянного тока независимого возбуждения. Для графического расчета тормозных сопротивлений принимается ряд условий (допущений):

1. Величина пускового сопротивления должна рассчитываться так, чтобы при скорости, равной нулю, пусковой момент двигателя равнялся критическому.

2. Рабочая ветвь механической характеристики асинхронных двигателей принимается линейной и на этом основании производится расчет пусковых сопротивлений графическим методом.

Однако в зоне **критических скольжений** реальные характеристики АД существенно отличаются от линейных. Это вносит значительные погрешности в результаты расчетов, а необходимость многократных построений пусковой диаграммы по уравнениям механических характеристик является весьма трудоемким.

Анализируя соотношения величин, входящих в уравнения механических характеристик асинхронных двигателей при введении сопротивлений в ротор, можно прийти к аналитическим методам расчета пусковых и тормозных сопротивлений.

Аналитический метод: Для расчета пусковых сопротивлений необходимо задаться пусковыми моментами максимальным M_1 и моментом переключения M_2 . Для получения общих закономерностей при выводе формул для расчета сопротивлений в нашем случае $M_1 = M_k$. Момент переключения M_2 в процессе расчета может изменяться, чтобы после отключения последней ступени сопротивления обеспечивался выход на естественную характеристику при моменте M_1 .

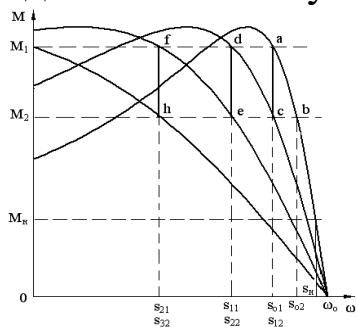


Рис. 21 К расчету пусковых сопротивлений аналитическим методом

Соответственно скольжения $s_{o1} = s_k$ для M_1 и s_{o2} для M_2 на рабочей ветви естественной механической характеристики. в точках a и b (рис.21) Находим из упрощенной формулы Клосса s_{o2} как:

$$M_2 = \frac{2M_k}{\frac{s_{o2}}{s_k} + \frac{s_k}{s_{o2}}}$$

$$s_{o2} = \frac{s_k}{\alpha} (1 - \sqrt{1 - \alpha^2}) \quad \text{где} \quad \alpha = \frac{M_2}{M_k} \quad (\text{АД.47})$$

Для определения скольжения введем

цифровое обозначение где первая цифра указывает на номер характеристики, а вторая – на индекс пускового момента.

Вывод начнем с введения коэффициент C , как отношение скольжений при пусковых моментах: $C = \frac{s_{11}}{s_{01}}$. (АД.48)

С другой стороны отношение скольжений в точках c и e можно выразить через активные сопротивления фазы обмотки ротора как

$$s_e = s_{01} = \frac{r_2}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}} \quad \frac{s_{11}}{s_{01}} = \frac{\frac{r_2 + R_1}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}}}{\frac{r_2}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}}} = \frac{r_2 + R_1}{r_2} \quad \text{откуда следует, что} \quad C = \frac{r_2 + R_1}{r_2} \quad (\text{АД.48})$$

Здесь r_2 и R_1 – активное сопротивление фазы обмотки ротора и добавочное сопротивление для первой после естественной механической характеристики.

По аналогии можно составить отношения скольжений для последующих искусственных механических характеристик: отношение скольжений в точках a и d равно отношению скольжений в точках d и f ,

$$\frac{s_{11}}{s_{01}} = \frac{r_2 + R_1}{r_2} = \frac{s_{21}}{s_{11}} = \frac{r_2 + R_2}{r_2 + R_1} \quad (\text{АД.49})$$

С учетом того, что отношение скольжений в точках a равно в c , отношению скольжений в точках e и c , и т.д. тогда можно записать соотношения как:

$$\frac{s_{11}}{s_{01}} = \frac{s_{22}}{s_{12}} = \frac{s_{12}}{s_{02}} = \frac{s_{01}}{s_{02}} \quad \text{из этого следует, что} \quad \tilde{N} = \frac{s_{01}}{s_{02}} = \frac{s_{11}}{s_{01}} \quad (\text{АД.49})$$

На основании соотношений можно составить равенства:

$$C = \frac{s_{11}}{s_{01}} = \frac{s_{21}}{s_{11}} = \frac{s_{31}}{s_{21}} = \dots = \frac{s_{m1}}{s_{m1-1}} \quad (22) \quad (\text{АД.50})$$

где s_{m1} – скольжение на последней от естественной (или 1-ой пусковой) характеристике при моменте M_1 .

s_{m1-1} – скольжение на механической характеристике при отключении 1-й ступени сопротивления (2-й пусковой) при моменте M_1 .

Возьмем два первых соотношения из (22) и $(\frac{s_{11}}{s_{01}} = \frac{s_{21}}{s_{11}})$ (23) и умножив

обе части равенства на отношение $\frac{s_{11}}{s_{01}}$, после небольших преобразова-

ний получим $C^2 = \frac{s_{21}}{s_{01}}$, (АД.50)

Следуя логике (22) и (23), можно показать, что $C = \frac{s_{11}}{s_{01}}$, $C^2 = \frac{s_{21}}{s_{01}}$, $C^3 = \frac{s_{31}}{s_{01}}$

$$C^m = \frac{s_{m1}}{s_{01}}. \quad (\text{АД.50})$$

Сопротивление в цепи ротора, соответствующее работе двигателя

на ближайшей к естественной характеристике можно записать из (

$$\frac{s_{o1} = r_2 + R_1}{s_{i2} \quad r_2} \text{ и } (C = \frac{r_2 + R_1}{r_2}) \text{ как: } R_1 = r_2 \cdot (C - 1) \quad (\text{АД.51})$$

из выражения (22) найдем сопротивление для второй от естественной характеристике: $R_2 = r_2 \cdot (C^2 - 1)$ (АД.51)

По аналогии, для m -ой искусственной характеристики, считая от естественной, т.е. для первой пусковой, сопротивление в цепи ротора определится из выражения: $R_m = r_2 \cdot (C^m - 1)$ (АД.51)

Первая пусковая характеристика должна проходить через точку с координатами: $s_{m1}=1$ и M_1 , поэтому из $(C^m = \frac{s_{m1}}{s_{o1}})$ следует, что $C^m = \frac{1}{s_{o1}}$ (АД.52)

Определив из $(C = \frac{s_{o1}}{s_{o2}})$ значение C , находим число ступеней пускового резистора, решив $(C^m = \frac{1}{s_{o1}})$ относительно m : $m = \frac{\ln(\frac{1}{s_{o1}})}{\ln(C)}$ (АД.52)

В том случае, если число ступеней получится дробным, или требуется большее число ступеней, чем найденное из выражения $(m = \frac{\ln(\frac{1}{s_{o1}})}{\ln(C)})$, необходимо его довести до требуемого целого числа m' . Изменение числа ступеней повлечет за собой изменение числа C и момента переключения M_2 . Новое значение C' определяется из выражения $(C^m = \frac{1}{s_{o1}})$

при принятом числе ступеней m' : $\tilde{N}' = m' \sqrt[m']{\frac{1}{s_{o1}}}$ (АД.52)

Для определения полного добавочного сопротивления в выражение $(R_m = r_2 \cdot (C^m - 1))$ должно быть выражено через параметры новых значений числа ступеней m' и C' : $R_{m'} = r_2 (C'^{m'} - 1)$. (АД.52)

Сопротивления для второй и последующих пусковых характеристик запишутся аналогично:

Тогда сопротивления отдельных ступеней пускового резистора r_{icm} определяются как: $r_{1\bar{n}\bar{o}} = R_{m'} - R_{m'-1} = r_2 (C'^{m'} - 1) - r_2 (C'^{m'-1} - 1) = r_2 C'^{m'-1} (C' - 1)$ (АД.53)

$$r_{2\bar{n}\bar{o}} = R_{m'-1} - R_{m'-2} = r_2 C'^{m'-2} (C' - 1); \quad r_{m'\bar{n}\bar{o}} = r_2 (C' - 1)$$

В случае, если требуется определить момент переключения M'_2 при принятом числе ступеней m' , необходимо из $(C = \frac{s_{o1}}{s_{o2}})$ определить значение

s'_{o2} , как $s'_{o2} = \frac{s_{o1}}{C'}$, далее преобразовав $(s_{o2} = \frac{s_k}{\alpha_2} (1 - \sqrt{1 - \alpha_2^2}))$ к виду $\alpha'_2 = \frac{2s_k s'_{o2}}{s'^2_{i2} + s_k^2}$, (АД.53) находим величину α'_2 и из $(M'_2 = M_e \alpha'_2)$ момент M'_2 .

Пример расчета пусковых сопротивлений

Для двигателя МТФ111 – 6У3 рассчитать пусковое сопротивление, число ступеней и сопротивления каждой ступени. Паспортные и каталожные данные двигателя: $P_n=3,5$ кВт, $n_n=895$ об/мин, $n_o=1000$ об/мин, $\mu_k=2,36$; $U_{2H}=165$ В; $I_{2H}=15$ А. Вычисляем: $s_n=0,105$; $s_k=0,671$ (0,473); $M_n=37$ Нм и $M_k=88$ Нм. (АД.54)

Задаемся условиями: момент сопротивления $M_c = M_n$, падение напряжения при пуске $\Delta U=10$ %, принимаем максимальный пусковой момент $M_1=\kappa_u^2 M_k$, момент переключения (предварительно) $M_2=1,15M_c$.

Решение: Определяем значения кратности пусковых моментов:

$$\alpha_1 = \frac{M_1}{M_\epsilon}, \quad \alpha_1=0,81 \quad \text{и} \quad \alpha_2 = \frac{M_2}{M_\epsilon} \quad \alpha_2=0,49 \quad (\text{АД.55})$$

Находим скольжения на рабочей ветви естественной механической характеристики при заданных значениях пусковых моментов:

$$s_{o1} = \frac{s_k}{\alpha_1} (1 - \sqrt{1 - \alpha_1^2}), \quad s_{o1}=0,34 \quad \text{и} \quad s_{o2} = \frac{s_k}{\alpha_2} (1 - \sqrt{1 - \alpha_2^2}) \quad s_{o2}=0,17. \quad (\text{АД.55})$$

Отношение скольжений на естественной характеристике при пусковых моментах находим из (2.65): $C = \frac{s_{o1}}{s_{o2}}, \quad C=1,96 \quad (\text{АД.56})$

Отношение скольжений на первой пусковой характеристике при $M_1, s=1$ и при M_1, s_{o1} определяется из (2.73), а из (2.74) – число ступеней пускового резистора:

$$m = \frac{\ln(\frac{1}{s_{o1}})}{\ln(C)}, \quad m=1,59 \quad (\text{АД.56})$$

Полученное число ступеней округляем до целого. Принимаем $m'=2$.

Этому числу ступеней должно соответствовать новое отношение скольжений на естественной характеристике при M_1 и новом моменте переключения:

$$\tilde{N}' = \sqrt[m']{\frac{1}{s_{o1}}}, \quad C'=2,25 \quad (\text{АД.56})$$

Активное сопротивление фазы ротора определяется как:

$$r_2 = \frac{U_{2f} s_f}{\sqrt{3} \cdot I_{2f}}, \quad r_2=0,67 \text{ Ом}$$

Полное добавочное сопротивление находим из:

$$R_{m'} = r_2 (C'^{m'} - 1), \quad R_m=1,28 \text{ Ом},$$

сопротивления ступеней из: $r_{1\tilde{n}\delta} = r_2 C'^{m'-1} (C' - 1), \quad r_{1cm}=0,83 \text{ Ом}$

$$r_{2\tilde{n}\delta} = r_2 C'^{m'-2} (C' - 1), \quad r_{2cm}=0,47 \text{ Ом}$$

Определяем величину момента при переключении сопротивления. Для этого вначале из находим скольжение на естественной характеристике при новом значении момента переключения:

$$s'_{o2} = \frac{s_{o1}}{C'}, \quad s'_{o2}=0,20,$$

$$\text{затем из кратность при этом моменте:} \quad \alpha'_2 = \frac{2s_k s'_{o2}}{s'^2_{o2} + s_k}, \quad \alpha'_2=0,55$$

и момент переключения из выражения (окончательно): $M'_2 = M_\epsilon \alpha'_2, M'_2=47,9$ Нм

Расчет сопротивлений тормозных режимов.

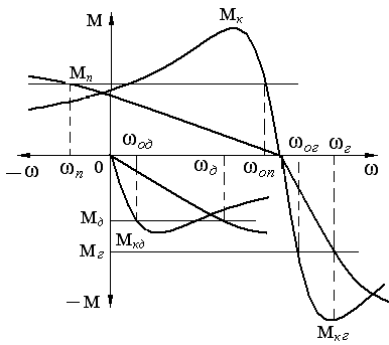


Рис 22. К расчету сопротивлений для тормозных режимов (АД.58)

Искомое сопротивление определяется из выражения $(R_m = r_2 \cdot (C^m - 1))$, как

$$r_2 = \frac{U_{2r} s_r}{\sqrt{3} \cdot I_{2r}} \quad R_{\bar{a}} = r_2 (C_{\bar{a}} - 1) \quad (\text{АД.59})$$

1. При расчете резистора для генераторного торможения с заданными параметрами M_z и ω_z (АД.59) вычисляется скольжение на искусственной характеристике тормозного режима $s_{z\bar{a}}$, по $s_{\bar{a}} = \frac{\omega_o - \omega_{\bar{a}}}{\omega_o}$ (АД.59) скольжение s_{oz} на естественной характеристике при том же моменте, по $s_{i\bar{a}} = \frac{s_k}{\alpha_{\bar{a}}} (1 - \sqrt{1 - \alpha_{\bar{a}}^2})$ коэффициент $C_{\bar{a}} = \frac{s_{\bar{a}}}{s_{o\bar{a}}}$ кратность моментов $\alpha_{\bar{a}} = \frac{M_{\bar{a}}}{M_{\bar{a}\bar{a}}}$, $i_{\bar{a}\bar{a}} = i_{\bar{a}} \frac{1 + s_k}{1 - s_k}$ (АД.59)

M_{kz} – критический момент для генераторного режима.
 M_k и s_k – критический момент и критическое скольжение на естественной характеристике в двигательном режиме.
 Искомое сопротивление определяется из выражения $(R_m = r_2 \cdot (C^m - 1))$, как

2. Для тормозного режима противовключением, ведется аналогичным образом предыдущим тормозным режимам, по заданной угловой скорости ω_n и моменту M_n . По скорости торможения вычисляется скольжение s_n на искусственной хар-ке, по $(s_{o1} = \frac{s_k}{\alpha_1} (1 - \sqrt{1 - \alpha_1^2}))$ (АД.60) скольжение s_{on} на естественной характеристике двигателя при том же моменте, по $C^m = \frac{s_{m1}}{s_{o1}}$ коэффициент C_n , и по $\alpha_1 = \frac{M_1}{M_{\bar{e}}}$ – кратность моментов α_n . Искомое сопротивление определяется как $R_r = r_2 (C_r - 1)$.

3. Для динамического тормозного режима при заданных параметрах торможения ω_d и M_d определяются значения относительных скоростей v_d и v_{od} на искусственной и естественной характеристиках:

$$v_{\bar{a}} = \frac{\omega_{\bar{a}}}{\omega_i}, \text{ и } v_{i\bar{a}} = \frac{v_{k\bar{a}}}{\alpha_{\bar{a}}} \cdot (1 - \sqrt{1 - \alpha_{\bar{a}}^2}) \text{ где } \alpha_{\bar{a}} = \frac{M_{\bar{a}}}{M_{\bar{e}\bar{a}}} \quad (\text{АД.61})$$

Критический момент $M_{k\bar{d}}$ и относительная критическая скорость $v_{k\bar{d}}$ на без реостатной характеристике динамического тормозного режима определяются из выражений: $M_{\bar{e}\bar{a}} = \frac{m \cdot I_1^2 \cdot x_{\mu}^2}{2 \cdot (x_{\mu} + x_2')}$ и $v_{k\bar{a}} = \frac{r_2'}{x_{\mu} + x_2'}$

Входящие в эти выражения параметры обмоток вычисляются для схемы замещения обычными методами. Тормозное сопротивление определяется из $R_{\bar{a}} = r_2 (\tilde{N}_{\bar{a}} - 1)$, $\tilde{N}_{\bar{a}} = \frac{v_{\bar{a}}}{v_{i\bar{a}}}$.

15. Компьютерный метод расчета пусковых сопротивлений АД.

Применение компьютеров значительно облегчает процесс расчета сопротивлений. Расчет осуществляется в два этапа. Вначале рассчитывается пусковая диаграмма, позволяющая определить скольжения, при которых происходит отключение ступеней сопротивлений и их число. После этого рассчитываются полное пусковое сопротивление и сопротивления каждой ступени. Для расчета пусковой диаграммы необходимо задаться максимальным пусковым моментом с учетом возможного падения напряжения, $\dot{I}_1 = k_u^2 M_{\dot{e}\dot{a}}$ и моментом переключения $M_2 = (1,1 \dots 1,3) M_c$. Здесь k_u – коэффициент падения напряжения и M_c – момент сопротивления на валу двигателя. Пусковая диаграмма рассчитывается условия, что пуск двигателя происходит при полном пусковом сопротивлении, максимальном пусковом моменте и критическом скольжении, равном 1. Выход на безреостатную характеристику происходит путем последовательного отключения ступеней пусковых сопротивлений при скольжении $s_{ке}$. Отключение ступеней сопротивлений происходит при моменте M_2 .

Для вычисления скольжений, при которых происходит отключение ступеней сопротивлений при моменте M_2 , в память ПК необходимо ввести соответствующие уравнения, полученные из упрощенной **формулы Клосса**:

$$s_i = s_{i-1} \left(\frac{M_1}{M_2} - \sqrt{\left(\frac{M_1}{M_2} \right)^2 - 1} \right)$$

При расчете пусковой диаграммы принято, что критическим скольжением каждой последующей искусственной механической характеристики является скольжение на предыдущей характеристике при моменте M_2 , то есть $s_i = s_{ki-1}$ (см. рис. 50). Последним вычисляется скольжение, равное или меньше критического на естественной характеристике. Если это последнее скольжение не равно, критическому $s_{ке}$, необходимо изменять в приведенной формуле значение момента переключения M_2 до совпадения вычисленного скольжений с $s_{ке}$. При этом следует иметь в виду, что момент переключения не должен приниматься меньше $1,1 M_c$.

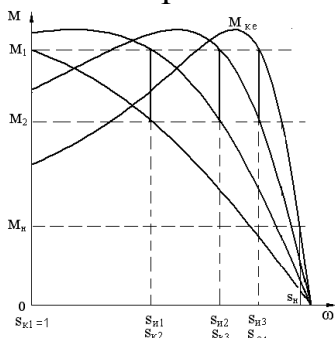


Рис.23 К расчету пусковых сопротивлений компьютерным методом

Для расчета сопротивления отдельных ступеней воспользуемся известными соотношениями:

$$s_{\dot{e}\dot{a}} = \frac{r_2}{\sqrt{r_1^2 + x_e^2}} \quad \text{и} \quad s_{\dot{e}i} = \frac{r_2 + R_i}{\sqrt{r_1^2 + x_e^2}}$$

В результате совместного их решения относительно R_i , получим:

$$R_i = r_2 \left(\frac{s_{\dot{e}i}}{s_{\dot{e}\dot{a}}} - 1 \right)$$

Следовательно, для первой искусственной характеристики пусковое сопротивление равно: $R_a = r_2 \left(\frac{1}{s_{\dot{e}\dot{a}}} - 1 \right)$.

После отключения первой ступени сопротивления:

$$R_{\dot{a}-1} = r_2 \left(\frac{s_{k2}}{s_{\dot{e}\dot{a}}} - 1 \right), \text{ второй } R_{\dot{a}-2} = r_2 \left(\frac{s_{k3}}{s_{\dot{e}\dot{a}}} - 1 \right).$$

И так для всех искусственных характеристик.

Сопротивление первой ступени определится как $r_{1cm} = R_a - R_{\dot{a}-1}$, второй

$r_{2cm} = R_{\dot{a}-1} - R_{\dot{a}-2}$ и т.д. для всех ступеней.

16. Механические хар - ки АД при асимметрии напряжения

Асимметрия напряжений в низковольтных трехфазных сетях довольно распространенное явление, хотя на практике принимаются меры по ее устранению или уменьшению. Асимметрия возникает в тех случаях, когда от трехфазной линии одновременно питаются трехфазные электродвигатели и неравномерно распределенные однофазные потребители. Асимметрия увеличивается, если линии имеют значительную протяженность и малое сечение проводов. Она может возникнуть из-за обрыва или большого сопротивления нулевого провода. Ее можно получить искусственно, включив в одну из фаз однофазный автотрансформатор. Асимметрия напряжений оказывает отрицательное влияние на работу трехфазных двигателей, т.к. приводит к уменьшению вращающего момента и потере мощности.

Несимметричное напряжение можно разложить на симметричные составляющие прямой, обратной и нулевой последовательности. Поскольку нулевой провод к обмоткам двигателей не подводится, напряжение нулевой последовательности можно не учитывать.

Напряжения прямой и обратной последовательности вызывает протекание в обмотках статора симметричных составляющих токов прямой и обратной последовательностей. Эти токи создают магнитные поля, вращающиеся во взаимно противоположных направлениях. Величина каждого из этих полей зависит от степени асимметрии. Для каждого вращающегося магнитного поля можно записать уравнение механической характеристики двигателя:

$$\dot{I}_{i\dot{\delta}} = \frac{2\dot{I}_{e.i\dot{\delta}}(1+\varepsilon)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2\varepsilon} \quad \text{и} \quad \dot{I}_{i\dot{\alpha}\dot{\delta}} = -\frac{2\dot{I}_{e.i\dot{\alpha}\dot{\delta}}(1+\varepsilon)}{\frac{2-s}{s_k} + \frac{s_k}{2-s} + 2\varepsilon} \quad (130)$$

$$\varepsilon = \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}} \frac{r_1}{r_2'} = \alpha s_k, \quad (82)$$

где $\alpha = \frac{r_1}{r_2'}$ – коэффициент сопротивлений.

Здесь $M_{к.пр}$ и $M_{к.обр}$ – соответственно критические моменты, обусловленные напряжениями прямой и обратной последовательностей. Для ротора, вращающегося в сторону поля прямой последовательности, скольжение выражается как s , а относительно поля обратной последовательности – как $(2-s)$. Численные значения критических моментов определяются из выражений:

$$M_{e.i\dot{\delta}} = M_{e.\bar{n}\dot{\delta}} \left(\frac{U_{i\dot{\delta}}}{U_{\bar{n}\dot{\delta}}} \right)^2 \quad \text{и} \quad M_{e.i\dot{\alpha}\dot{\delta}} = M_{e.\bar{n}\dot{\delta}} \left(\frac{U_{i\dot{\alpha}\dot{\delta}}}{U_{\bar{n}\dot{\delta}}} \right)^2 \quad (131)$$

где $U_{пр}$ и $U_{обр}$ —напряжения прямой и обратной последовательностей

Механические характеристики асинхронного двигателя при симметричном напряжении $M_{сим}$, для напряжений прямой и обратной последовательностей $M_{пр}$ и $M_{обр}$, а также суммарная характеристика $M=M_{пр}+M_{обр}$ представлены на **рис. 132**,

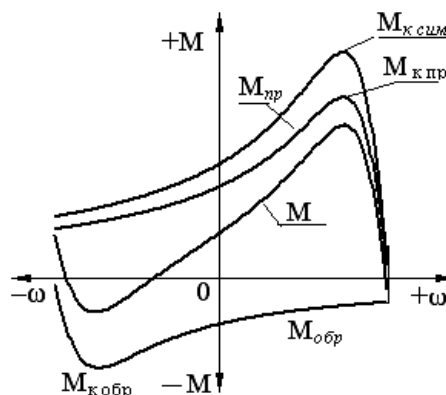


Рис 132 Механические характеристики АД при асимметрии напряжения сети.

Из графиков видно, что в двигательном режиме прямого вращения результирующая характеристика M проходит ниже характеристики, полученной при симметричном напряжении. Даже незначительный перекос напряжений сети может существенно уменьшить величину моментов (пускового, максимального и номинальный) и при нагрузках, не превышающих номинальную, двигатель может перегреваться.

Предельной асимметрией напряжений является однофазное включение двигателя, когда коэффициент асимметрии, определяемый как отношение напряжения обратной последовательности к напряжению прямой последовательности, равен единице.

В этом случае величина магнитного поля прямого вращения равна величине поля обратного вращения. Механические характеристики $M_{пр}$ и $M_{обр}$ одинаковы и действуют во взаимно противоположных направлениях. При скорости вала, равной нулю, моменты прямого и обратного вращения одинаковы, а результирующий момент равен нулю. При питании трехфазного двигателя от однофазной сети он не развивает пускового момента. При скоростях, отличных от нуля, направление суммарного вращающего момента двигателя совпадает с направлением вращения.

17. Механические характеристики однофазных АД.

При полной асимметрии напряжений, то есть при однофазном токе АД способен развивать вращающие моменты, что говорит о возможности использования однофазных двигателей. Однофазный двигатель – это двигатель, на статоре которого уложена только одна обмотка, по которой протекает однофазный ток. Этот ток создает в двигателе переменный, изменяющийся по закону синуса и неподвижный в пространстве магнитный поток. Магнитный поток может быть представлен суммой двух, одинаковых по величине вращающихся во взаимно противоположных направлениях с одинаковой скоростью, магнитных потоков, каждый из которых равен половине амплитуды переменного магнитного потока.

как видно из выражений ($i_{i\delta} = \frac{2I_{\epsilon.i\delta}(1+\epsilon)}{s_k + \frac{s_k}{s} + 2\epsilon}$ и $i_{i\alpha\delta} = -\frac{2I_{\epsilon.i\alpha\delta}(1+\epsilon)}{\frac{2-s}{s_k} + \frac{s_k}{2-s} + 2\epsilon}$) (130) и гра-

фика (рис. 132) не развивает момента при скорости, равной нулю.

Для создания пускового момента необходимо присутствие признаков многофазного тока: на статоре должно быть уложено не менее двух обмоток, сдвинутых между собою в пространстве, и протекание по этим обмоткам токов, сдвинутых между собою по фазе. Одна из этих обмоток называется основной или рабочей, вторая – вспомогательной или пусковой. В цепь пусковой обмотки вводятся элементы, обеспечивающие сдвиг по фазе тока этой обмотки относительно тока рабочей обмотки.

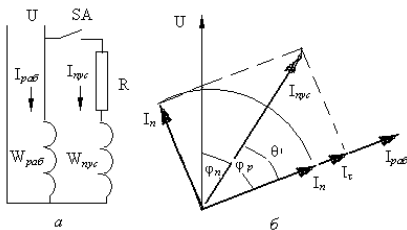


Рис 131 Схемы включения - а и векторная диаграмма – б однофазного двигателя с резисторным пуском

ма б однофазного двигателя при омическом сопротивлении в цепи пусковой обмотки (резисторный пуск). Ток рабочей $I_{раб}$ и ток пусковой обмоток $I_{пус}$ сдвинуты между собою по фазе на угол θ . Эти токи создают магнитодвижущие силы на рисунке 131 обозначены теми же символами, что и токи), совпадающие по фазе со своими токами, и сдвинутые между собою на тот же угол θ .

М.д.с. пусковой обмотки можно разложить на составляющие: тангенциальную I_t , совпадающую по фазе с м.д.с. рабочей обмотки, и нормальную I_n , опережающую на 90 градусов м.д.с. рабочей обмотки. Нормальная

составляющая м.д.с. пусковой обмотки и равная ей по величине часть м.д.с. рабочей обмотки создают круговое вращающееся магнитное поле.

Тангенциальная составляющая м.д.с. пусковой обмотки и оставшаяся часть м.д.с. рабочей обмотки совпадают между собою по фазе, но сдвинуты в пространстве на угол, равный углу сдвига рабочей и пусковой обмоток. Они образуют суммарную пульсирующую м.д.с. Эти м.д.с.–вращающаяся и пульсирующая – складываясь, создают эллиптическое магнитное поле. Благодаря круговой составляющей магнитного поля, двигатель способен развивать пусковой момент.

Как видно из схемы и векторной диаграммы (**рис.132**), вращающаяся составляющая магнитного поля, а следовательно и пусковой момент будут тем больше, чем ближе угол сдвига по фазе между м.д.с. пусковой и рабочей обмоток к 90 градусам, а магнитное поле ближе к круговому вращающему полю. Добиться этого за счет увеличения омического сопротивления в цепи пусковой обмотки не удастся, т.к. с увеличением сопротивления угол сдвига между токами не может быть больше чем φ_1 , при этом ток в пусковой обмотке уменьшается до нуля. Другая причина, повышенное омическое сопротивление приводит к значительным потерям мощности и перегреву пусковой обмотки. Поэтому пусковую обмотку включают лишь на время пуска двигателя. После разбега и отключения пусковой обмотки двигатель переходит на механическую характеристику от пульсирующего магнитного поля, образованного током рабочей обмотки.

При включении в цепь пусковой обмотки емкости (конденсаторный пуск) можно получить в ней довольно большой по величине ток, сдвинутый по фазе относительно тока рабочей обмотки на угол, близкий к 90 градусам и более. Благодаря этому нормальная составляющая м.д.с. пусковой обмотки может быть увеличена, а пусковые моменты будут значительно превосходить по величине моменты двигателей с резисторным пуском. Следует помнить, что ток в пусковой обмотке при этом достигает больших значений, поэтому после разбега двигателя пусковую обмотку отключают, либо оставляют ее включенной с небольшой частью емкости.

18. Использование 3-фазных АД в 1-фазном режиме.

Для работы в однофазном режиме трехфазного асинхронного двигателя одна часть фазных обмоток статора используется в качестве рабочей обмотки, другая часть – пусковой. При выборе схемы соединения обмоток двигателя для однофазного режима **напряжение**, приходящееся на каждую фазную обмотку, по возможности должно быть **близким к номинальному**, но не превышать его.

Формирование рабочих и пусковых обмоток осуществляется путем встречно-параллельного (рис. 134а 1.1 и 1.2.) или встречно-последовательного соединения фазных обмоток (рис. 134а 1.2 и 1.3). В этом случае м.д.с., образованные рабочей и пусковой обмотками сдвинуты между собою в пространстве на угол 90 градусов. **Последовательно с пусковой обмоткой** включается **фазосдвигающий элемент**: омическое сопротивление или емкость.

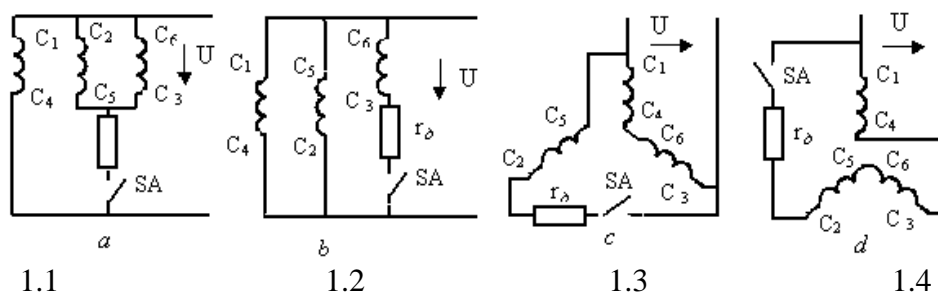


Рис 134а Схемы включения трехфазно АД в однофазную сеть при резисторном пуске

Величина пускового момента трехфазных двигателей в однофазных режимах определяется типом и величиной параметров фазосдвигающих элементов в цепи пусковой обмотки. В схемах резисторного пуска при пусковом сопротивлении, равном нулю, ток в пусковой обмотке протекает максимальный, но отсутствует сдвиг по фазе токов в обмотках. С увеличением сопротивления ток пусковой обмотки уменьшается, а сдвиг увеличивается. При определенном соотношении тока и сдвига между токами возникает максимальный пусковой момент. Дальнейшее увеличение сопротивления ведет к уменьшению тока пусковой обмотки и пускового момента до нуля.

В случае, когда подводимое к двигателю напряжение, равно его номинальному фазному напряжению, для резисторного пуска целесообразно использовать схемы, приведенные на рис.134а 1.1 или 1.2. Кратность пускового момента при этом находится в пределах 0,35...0,4. При схеме, изображенной на рисунках рис.134а 1.3 и 1.4, кратность пускового момента достигает 0,2.

Под кратностью пускового момента здесь следует понимать отношение пускового момента в однофазном режиме к номинальному моменту трехфазного режима.

$$\mu_{i\dot{i}} = \frac{\dot{I} \dot{i}\dot{i}}{\dot{I} \dot{i}\dot{a}}$$

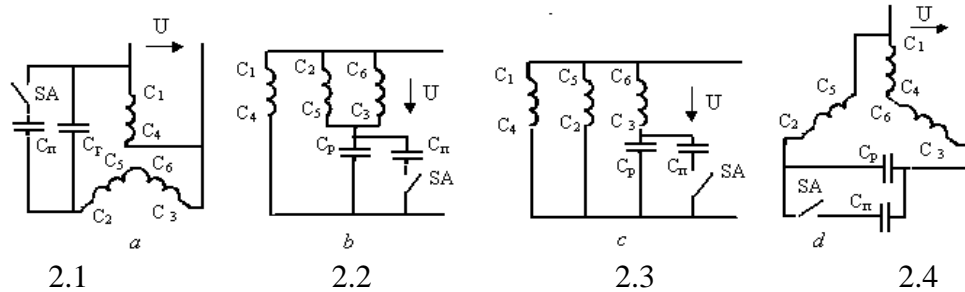


Рис 1346 Схемы включения трехфазно АД в однофазную сеть при конденсаторном пуске

На **рис. 134** приведены те же схемы включения трехфазных асинхронных электродвигателей в сеть однофазного тока с конденсаторным пуском. В схемах с конденсаторным пуском (**рис. 1346**) при малой емкости сдвиг между токами значительно больше 90 градусов и ток пусковой обмотки близок к нулю поэтому пусковой момент практически отсутствует. С увеличением емкости ток в пусковой обмотке растет, сдвиг между токами уменьшается и при угле сдвига, близком к 90 градусам, эллиптическое магнитное поле приближается к круговому, а пусковой момент достигает максимального значения. Дальнейшее увеличение емкости ведет к уменьшению и тока, и сдвига, в результате чего происходит уменьшение пускового момента. При напряжении питания, равном номинальному фазному напряжению трехфазного режима, пусковой момент при соединении обмоток двигателя по схемам **рис. 1346**, 2.1 и 2.4, может достигать номинального, а схемы (**рис. 1346**) 2.2 и 2.3 позволяют получить так же значительные пусковые моменты.

В схемах конденсаторного пуска при максимальных кратностях пусковых моментов возникают явления, близкие к резонансу напряжений, сопровождающиеся увеличением тока и напряжения на зажимах пусковых обмоток и конденсаторов. Поэтому включение двигателя с полной емкостью должно быть кратковременным и после разбега часть емкости (называемая - пусковой) отключается, а небольшая емкость (рабочая) Пусковая обмотка остается включенной. Это позволяет несколько увеличить мощность двигателя в однофазном режиме. Величина рабочей емкости не должна превышать 1/3 от пусковой. Мощность АД (двигателя) в однофазном режиме составляет 0,55...0,6 номинальной паспортной мощности.

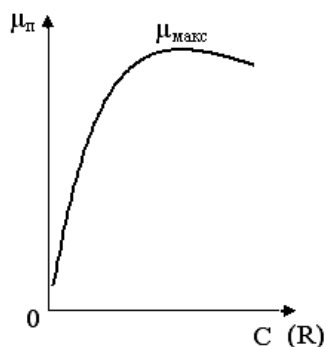


Рис 135 Зависимость пускового момента от параметров фазосдвигающего элемента

На **рис. 135** показана зависимость изменения кратности пускового момента μ_n от омического сопротивления при резисторном, или от емкости конденсаторов при конденсаторном пуске. Примерно такую зависимость пускового момента от величины параметров фазосдвигающих элементов имеют все схемы однофазного включения трехфазных двигателей. Для получения максимальной кратности пускового момента μ_{\max} необходимо в цепь пусковой обмотки при резисторном пуске включить омическое сопротивление из расчета

$$R_i = z_i$$

z_n —модуль полного сопротивления короткого замыкания пусковой обмотки и при конденсаторном пуске емкостное сопротивление

$$x_c = z_i .$$

Отсюда пусковая емкость конденсаторов

$$C = \frac{10^6}{\omega \cdot x_{\tilde{n}}}, \text{ мкФ} .$$

В этих выражениях z_n —модуль полного сопротивления короткого замыкания пусковой обмотки, определяемый как: – **134с**.

$Z_{\text{фк}}$ - сопротивление фазы двигателя при коротком замыкании, определяется:

$$z_{\hat{o}\hat{e}} = \frac{U_{\hat{o}\hat{i}}}{k_i I_{\hat{o}\hat{i}}} ,$$

где $U_{\text{фн}}$ – номинальное фазное напряжение двигателя;

$I_{\text{фн}}$ – номинальный фазный ток двигателя;

k_i – кратность пускового тока.