

Федеральное агентство по образованию
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МАМИ»

Кафедра: Электротехника и компьютеризированные
электромеханические системы

Кецарис А.А. Полякова В.Н.

Трехфазный асинхронный двигатель.

Учебное пособие для выполнения расчетно-графических работ
по курсу

«Общая электротехника»

Допущено УМО вузов РФ по образованию
в области транспортных машин
транспортнотехнологических комплексов
в качестве учебного пособия для
студентов, изучающих курс
"Общая электротехника"

Москва 2009г.

УДК 621.313.001.2

Кецарис А.А.

Полякова В.Н.

Трехфазный асинхронный двигатель.

Учебное пособие для выполнения расчетно-графических работ по курсу "Общая электотехника". стр. 36, Рис. 29, табл. 4, библи. 3, МАМИ, 2009 г.

В учебном пособии приведены сведения о вращающемся магнитном поле и трехфазном асинхронном двигателе, необходимые для выполнения расчетно-графической работы. Даны примеры расчета трехфазного асинхронного двигателя.

Пособие предназначено для студентов, изучающих курс "Общая электротехника".

1. Задание на расчетно-графическую работу.

1.1. Задача №5. Варианты 1 – 25.

Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором, обмотка ротора которого соединена звездой, а номинальная полезная мощность которого равна $P_{2н}$, включен в сеть с номинальным напряжением $U_{1н}$ и частотой $f_1 = 50$ Гц. Скорость вращения ротора в номинальном режиме равна $n_{2н}$. Коэффициент полезного действия двигателя в номинальном режиме равен η_n . Косинус угла нагрузки, с которым двигатель работает в номинальном режиме, равен $\cos \varphi_n$. Число пар полюсов обмотки статора равно p . Кроме того задано отношение максимального момента двигателя к его пусковому моменту $M_k/M_{п}$.

Определить:

- номинальный ток статора $I_{1н}$,
- полные потери двигателя при номинальной нагрузке $P_{1н} - P_{2н}$,
- построить естественную механическую характеристику $n_2(M)$.

Таблица 1.

| № вар. | $U_{1н}$ В | $P_{2н}$ кВт | $n_{2н}$ об/мин | η_n % | $\cos \varphi_n$ | M_k/M_n | p |
|-----------|---------------|-----------------|--------------------|---------------|------------------|-----------|-----|
| 1 | 220 | 55 | 1440 | 90,5 | 0,84 | 2,0 | 2 |
| 2 | 220 | 75 | 1450 | 90,5 | 0,85 | 2,0 | 2 |
| 3 | 220 | 100 | 1450 | 90,5 | 0,85 | 2,0 | 2 |
| 4 | 220 | 30 | 960 | 89,0 | 0,84 | 1,8 | 3 |
| 5 | 220 | 40 | 960 | 89,0 | 0,85 | 1,8 | 3 |
| 6 | 220 | 55 | 960 | 89,0 | 0,86 | 1,8 | 3 |
| 7 | 220 | 75 | 960 | 90,5 | 0,86 | 1,8 | 3 |
| 8 | 220 | 22 | 720 | 87,5 | 0,79 | 1,7 | 4 |
| 9 | 220 | 30 | 720 | 87,5 | 0,79 | 1,7 | 4 |
| 10 | 220 | 40 | 720 | 87,5 | 0,81 | 1,7 | 4 |
| 11 | 220 | 55 | 720 | 90,0 | 0,81 | 1,7 | 4 |
| 12 | 220 | 10 | 1480 | 85,0 | 0,82 | 2,0 | 2 |
| 13 | 220 | 7,5 | 960 | 84,0 | 0,82 | 1,8 | 3 |
| 14 | 220 | 10 | 960 | 85,0 | 0,83 | 1,8 | 3 |
| 15 | 220 | 5,5 | 710 | 82,0 | 0,72 | 1,7 | 4 |
| 16 | 220 | 2,2 | 875 | 64,0 | 0,72 | 2,3 | 3 |
| 17 | 220 | 3,5 | 910 | 70,5 | 0,73 | 2,5 | 3 |
| 18 | 220 | 5,0 | 940 | 74,5 | 0,68 | 2,9 | 3 |
| 19 | 220 | 7,5 | 945 | 78,5 | 0,69 | 2,8 | 3 |
| 20 | 220 | 11 | 953 | 82,5 | 0,71 | 3,1 | 3 |
| 21 | 220 | 7,5 | 720 | 77,5 | 0,69 | 2,6 | 4 |
| 22 | 220 | 11 | 720 | 81,0 | 0,70 | 2,9 | 4 |
| 23 | 220 | 16 | 710 | 82,5 | 0,74 | 3,0 | 4 |
| 24 | 220 | 22 | 710 | 84,5 | 0,67 | 3,0 | 4 |
| 25 | 220 | 30,6 | 720 | 86,0 | 0,71 | 3,0 | 4 |

1.2. Задача №5. Варианты 26 – 50.

Трёхфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, номинальная полезная мощность которого равна $P_{2н}$, включен в сеть с номинальным напряжением $U_{1н}$ и частотой $f_1 = 50$ Гц. Скольжение ротора в номинальном режиме равно s_n . Коэффициент полезного действия двигателя в номинальном режиме равен η_n . Косинус угла нагрузки, с которым двигатель работает в номинальном режиме, равен $\cos \varphi_n$. Число пар

полюсов обмотки статора равно p . Кроме того заданы отношение максимального момента двигателя к его пусковому моменту $M_k/M_{\text{п}}$, отношение пускового момента двигателя к его номинальному моменту $M_k/M_{\text{н}}$ а также отношение пускового тока двигателя к его номинальному току $I_{\text{п}}/I_{\text{н}}$. . Определить:

- номинальный $I_{\text{н}}$ и пусковой $I_{\text{п}}$ токи, номинальный $M_{\text{н}}$, пусковой $M_{\text{п}}$ и максимальный M_k моменты.
- Как изменится пусковой момент двигателя при снижении напряжения на его зажимах на 15% и возможен ли пуск двигателя при этих условиях с номинальной нагрузкой?

Таблица 2.

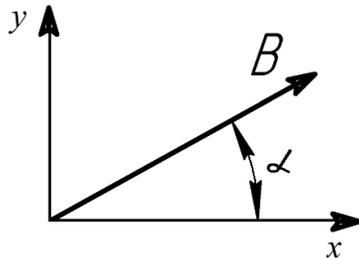
| № вар. | U_{1H} В | P_{2H} кВт | s_H % | η_H | $\cos \varphi_H$ | p | M_k/M_{II} | M_{II}/M_H | I_{II}/I_H |
|-----------|---------------|-----------------|------------|----------|------------------|-----|--------------|--------------|--------------|
| 26 | 220 | 0,8 | 3,0 | 0,78 | 0,86 | 1 | 2,2 | 1,9 | 7,0 |
| 27 | 220 | 0,1 | 3,0 | 0,795 | 0,87 | 1 | 2,2 | 1,9 | 7,0 |
| 28 | 220 | 1,5 | 4,0 | 0,805 | 0,88 | 1 | 2,2 | 1,8 | 7,0 |
| 29 | 220 | 2,2 | 4,5 | 0,83 | 0,89 | 1 | 2,2 | 1,8 | 7,0 |
| 30 | 220 | 3,0 | 3,5 | 0,845 | 0,89 | 1 | 2,2 | 1,7 | 7,0 |
| 31 | 220 | 4,0 | 2,0 | 0,855 | 0,89 | 1 | 2,2 | 1,7 | 7,0 |
| 32 | 220 | 5,5 | 3,0 | 0,86 | 0,89 | 1 | 2,2 | 1,7 | 7,0 |
| 33 | 220 | 7,5 | 3,5 | 0,87 | 0,89 | 1 | 2,2 | 1,6 | 7,0 |
| 34 | 220 | 10 | 4,0 | 0,88 | 0,89 | 1 | 2,2 | 1,5 | 7,0 |
| 35 | 220 | 13 | 3,5 | 0,88 | 0,89 | 1 | 2,2 | 1,5 | 7,0 |
| 36 | 220 | 17 | 3,5 | 0,88 | 0,90 | 1 | 2,2 | 1,2 | 7,0 |
| 37 | 220 | 22 | 3,5 | 0,88 | 0,90 | 1 | 2,2 | 1,1 | 7,0 |
| 38 | 220 | 30 | 3,0 | 0,89 | 0,90 | 1 | 2,2 | 1,1 | 7,0 |
| 39 | 220 | 40 | 3,0 | 0,89 | 0,91 | 1 | 2,2 | 1,0 | 7,0 |
| 40 | 220 | 55 | 3,0 | 0,90 | 0,92 | 1 | 2,2 | 1,0 | 7,0 |
| 41 | 220 | 75 | 3,0 | 0,90 | 0,92 | 1 | 2,2 | 1,0 | 7,0 |
| 42 | 220 | 100 | 2,5 | 0,915 | 0,92 | 1 | 2,2 | 1,0 | 7,0 |
| 43 | 380 | 10 | 3,0 | 0,885 | 0,87 | 2 | 2,2 | 1,4 | 7,0 |
| 44 | 380 | 13 | 3,0 | 0,885 | 0,89 | 2 | 2,0 | 1,3 | 7,0 |
| 45 | 380 | 17 | 3,0 | 0,89 | 0,89 | 2 | 2,0 | 1,3 | 7,0 |
| 46 | 380 | 22 | 3,0 | 0,90 | 0,90 | 2 | 2,0 | 1,2 | 7,0 |
| 47 | 380 | 30 | 3,0 | 0,91 | 0,91 | 2 | 2,0 | 1,2 | 7,0 |
| 48 | 380 | 40 | 3,0 | 0,925 | 0,92 | 2 | 2,0 | 1,1 | 7,0 |
| 49 | 380 | 55 | 3,0 | 0,925 | 0,92 | 2 | 2,0 | 1,1 | 7,0 |
| 50 | 380 | 75 | 3,0 | 0,925 | 0,792 | 2 | 2,0 | 1,1 | 7,0 |

2. Необходимые сведения о вращающемся магнитном поле.

Трехфазные асинхронные двигатели выполняют преобразование электрической энергии трехфазного тока в механическую энергию вращательного движения. Это преобразование осуществляется с помощью *вращающегося магнитного поля*. Другими словами, вращающееся магнитное поле является своего рода посредником при указанном преобразовании.

нии.

2.1. Общее представление о вращающемся магнитном поле.



Рассмотрим геометрическую плоскость (рис.1). Введем на ней систему координат YOX . Пусть в начале координат задан вектор магнитной индукции \mathbf{B} . Этот вектор составляет угол α с осью абсцисс. Координаты вектора магнитной индукции записываются следующим образом

$$B_x = B \cos \alpha$$

$$B_y = B \sin \alpha .$$

Рис. -1.1: Вращение вектора магнитной индукции.

Пусть с течением времени вектор магнитной индукции продолжает располагаться в плоскости, величина вектора не меняется, а вектор изменяется только по направлению. Тогда магнитное поле, характеризуемое таким вектором магнитной индукции, называется *вращающимся*. Таким образом, для вращающегося магнитного поля

$$\alpha = \alpha(t) ,$$

где символом t обозначено время.

Далее мы будем иметь дело с *равномерно вращающимся* магнитным полем, когда

$$\alpha = \Omega \cdot t .$$

Здесь Ω - угловая скорость вращения, имеет размерность рад/сек. Для равномерно вращающегося поля имеем

$$B_x = B \cos \Omega \cdot t$$

$$B_y = B \sin \Omega \cdot t .$$

При такой записи вращение происходит против часовой стрелки. Для вращения по часовой стрелке имеем:

$$B_x = B \cos \Omega \cdot t$$

$$B_y = -B \sin \Omega \cdot t .$$

2.2. Средства для создания вращающегося магнитного поля.

Средствами для создания вращающегося магнитного поля являются

1. Трехфазный (в общем случае *многофазный*) источник напряжения.
2. Трехфазная (в общем случае *многофазная*) обмотка.

Далее остановимся на этих средствах подробнее.

2.3. Трехфазный источник напряжения.

Трехфазный источник напряжения - это совокупность трех источников синусоидального напряжения с одинаковой амплитудой и периодом. На этих источниках введен порядок, задаваемый тем, что источники обозначены латинскими буквами в алфавитном порядке

$$A, \quad B, \quad C.$$

При этом напряжение каждого последующего источника сдвинуто относительно напряжения предыдущего источника на временной отрезок

$$t_0 = \frac{T}{3},$$

где T – период колебаний. Каждый из источников называется *фазой* (соответственно А, В, С).

Таким образом, напряжения фаз трехфазного источника определяются уравнениями

$$\begin{aligned} u_A &= U_m \sin \omega t, \\ u_B &= U_m \sin \omega \left(t - \frac{T}{3} \right), \\ u_C &= U_m \sin \omega \left(t - 2\frac{T}{3} \right) = U_m \sin \omega \left(t + \frac{T}{3} \right), \end{aligned}$$

где U_m – амплитуда напряжения, $\omega = 2\pi f$ – круговая частота напряжения, а $f = \frac{1}{T}$ – частота напряжения.

Обратимся теперь к трехфазной обмотке.

2.4. Трехфазная обмотка.

Трехфазная обмотка состоит из трех одинаковых частей, уложенных на цилиндрической поверхности. Каждая часть называется *фазой*.¹

¹Таким образом, слово *фаза* используется в нескольких смыслах: фаза обмотки, фаза источника, фаза – угол по знаку синуса. Смысл, в котором используется слово "фаза", должен вытекать из контекста изложения.

Сначала рассмотрим устройство одной фазы. Фаза обмотки состоит из k катушек, равномерно уложенных на цилиндрической поверхности и соединенных между собой последовательно согласно.² Рассмотрим устройство одной фазы обмотки для нескольких значений k . При этом будем изображать фазы на двух проекциях: 1. на плоскости, перпендикулярной оси цилиндрической поверхности, 2. на *развертке* цилиндрической поверхности.

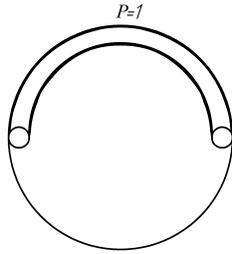


Рис. -1.2: Катушка фазы обмотки статора $k = 1$.

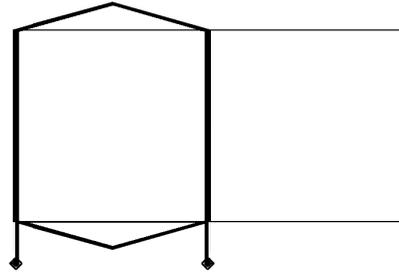


Рис. -1.3: Развертка фазы обмотки статора $k = 1$.

1. $k = 1$, рис.2, рис.3,

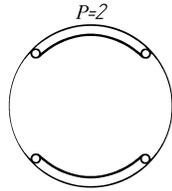


Рис. -1.4: Две катушки фазы обмотки статора $k = 2$.

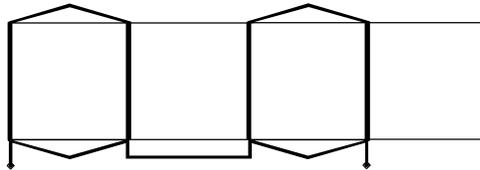


Рис. -1.5: Развертка фазы обмотки статора $k = 2$.

2. $k = 2$, рис.4, рис.5,

²"Равномерно уложенные" означает, что ширина катушек равна расстоянию между соседними катушками. "Соединенные согласно" означает, что конец предыдущей катушки соединен с началом последующей.

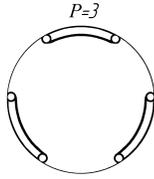


Рис. -1.6: Три катушки фазы обмотки статора $k = 3$.

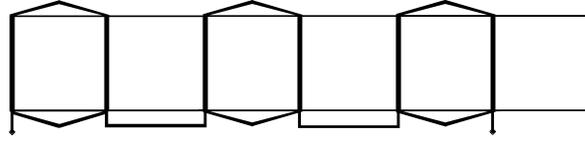


Рис. -1.7: Развертка фазы обмотки статора $k = 3$.

3. $k = 3$, рис.6, рис.7.

Остальные фазы обмотки выполнены аналогичным образом. На фазах обмотки введен порядок, задаваемый тем, что фазы обозначены латинскими буквами в алфавитном порядке

$$A, \quad B, \quad C.$$

Каждая последующая фаза обмотки уложена на цилиндрической поверхности со сдвигом относительно предыдущей фазы на угол

$$\alpha_0 = \frac{2\pi}{3k}, \quad (-1.1)$$

Таким образом, угловой сдвиг между фазами обмотки для различного числа катушек в фазе принимает значения, указанные в таблице 3.

Таблица 3.

| k | α_0 , рад | α_0 , град |
|-----|------------------|-------------------|
| 1 | $\frac{2\pi}{3}$ | 120 |
| 2 | $\frac{\pi}{3}$ | 60 |
| 3 | $\frac{2\pi}{9}$ | 40 |
| 4 | $\frac{\pi}{6}$ | 30 |

2.5. Магнитное поле фазы трехфазной обмотки.

Фазы трехфазной обмотки подсоединим к соответствующим фазам источника напряжения. Одна из возможных схем соединения представлена на рис.8. По фазам обмотки протекают переменные токи соответственно i_A, i_B, i_C . Каждый из токов создает магнитное поле соответствующей фазы.

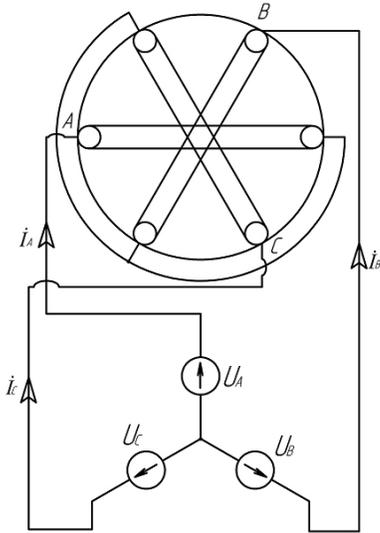


Рис. -1.8: Схема соединения фаз обмотки к фазам источника.

силовые линии входят в область, ограниченную этой поверхностью, есть *северный полюс N*. Часть цилиндрической поверхности, в которую силовые линии входят из области, ограниченной этой поверхностью, есть *южный полюс S*. Таким образом, магнитное поле внутри цилиндрической поверхности является двухполюсным.

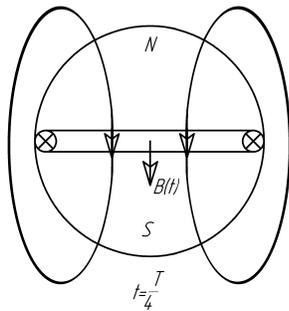


Рис. -1.9: Катушка фазы обмотки статора $k = 1$.

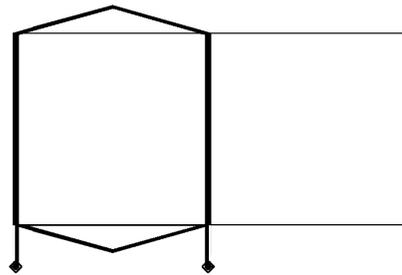


Рис. -1.10: Развертка фазы обмотки статора $k = 1$.

Прежде всего нас будет интересовать та часть магнитного поля, которая сосредоточена в области, ограниченной упомянутой цилиндрической поверхностью. Магнитные поля каждой из фаз складываются и образуют общее магнитное поле. Наша задача как раз и состоит в том, чтобы рассмотреть магнитное поле, создаваемое трехфазной обмоткой, подключенной к трехфазному источнику напряжения. Эту задачу мы будем решать в несколько этапов. Сначала рассмотрим магнитное поле, создаваемое одной фазой обмотки (например, фазой A). Мы рассмотрим несколько случаев в зависимости от числа катушек в фазе.

1. Число катушек в фазе $k = 1$. Магнитное поле в определенный момент времени представлено на рис.9 и рис.10. Часть цилиндрической поверхности, из которой си-

В теории электрических машин принято обозначать число пар полюсов магнитного поля буквой p . Отсюда следует, что в рассматриваемом случае

$$p = k = 1.$$

Так как ток i_A , создающий магнитное поле, является синусоидальным, то магнитное поле так же является синусоидальным, пульсирующим вдоль оси катушки фазы с частотой f . Пусть магнитное поле, показанное на рис.9, соответствует времени $t = \frac{1}{4}T$, является максимальным и направлено вдоль положительного направления оси катушки, тогда при $t = \frac{1}{2}T$ магнитное поле отсутствует, а при $t = \frac{3}{4}T$ магнитное поле является максимальным и направлено вдоль отрицательного направления оси катушки.

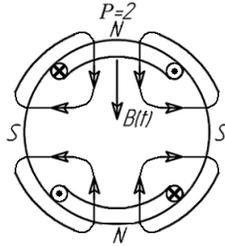


Рис. -1.11: Две катушки фазы обмотки статора $k = 2$.

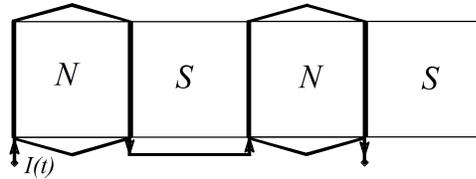


Рис. -1.12: Развертка фазы обмотки статора $k = 2$.

2. Число катушек в фазе $k = 2$. Магнитное поле в определенный момент времени представлено на рис.11, рис.12. Две части цилиндрической поверхности, из которых силовые линии входят в область, ограниченную этой поверхностью, есть два северных полюса N . Две части цилиндрической поверхности, в которые силовые линии входят из области, ограниченной этой поверхностью, есть два южных полюса S . Таким образом, магнитное поле внутри цилиндрической поверхности является четырехполюсным. Отсюда следует, что в рассматриваемом случае

$$p = k = 2.$$

Так как ток i_A , создающий магнитное поле, является синусоидальным, то магнитное поле так же является синусоидальным, пульсирующим вдоль осей катушек фазы с частотой f .

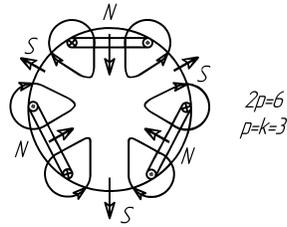


Рис. -1.13: Три катушки фазы обмотки статора $k = 3$.

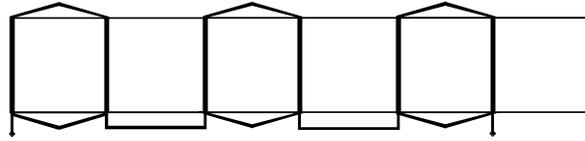


Рис. -1.14: Развертка фазы обмотки статора $k = 3$.

3. Число катушек в фазе $k = 3$. Магнитное поле в определенный момент времени представлено на рис.13 и рис.14. Три части цилиндрической поверхности, из которых силовые линии входят в область, ограниченную этой поверхностью, есть три северных полюса N . Три части цилиндрической поверхности, в которые силовые линии входят из области, ограниченной этой поверхностью, есть три южных полюса S . Таким образом, магнитное поле внутри цилиндрической поверхности является шестиполюсным. Отсюда следует, что в рассматриваемом случае

$$p = k = 3.$$

Так как ток i_A , создающий магнитное поле, является синусоидальным, то магнитное поле так же является синусоидальным, пульсирующим вдоль осей катушек фазы с частотой f .

Очевидно, что в общем случае магнитное поле является $2p$ -полюсным, где

$$p = k, \tag{-1.2}$$

и синусоидальным, пульсирующим вдоль осей катушек фазы с частотой f . Соотношение (-1.2) позволяет записать угол сдвига между соседними фазами (-1.1) в следующем виде

$$\alpha_0 = \frac{2\pi}{3p}. \tag{-1.3}$$

В дальнейшем мы воспользуемся этой формулой.

2.6. Скорость вращения магнитного поля.

В общем случае фаза обмотки содержит k катушек и создает $2p$ -полюсное магнитное поле, где $p = k$. Вектор магнитной индукции поворачивается на угол сдвига между фазами обмотки

$$\alpha_0 = \frac{2\pi}{3p}.$$

за временной отрезок, на который сдвинуты колебания напряжения соседних фаз источника

$$t_0 = \frac{T}{3}.$$

Отсюда угловая скорость вращения магнитного поля

$$\Omega = \frac{\alpha_0}{t_0} = \frac{2\pi}{3p} \frac{3}{T} = \frac{2\pi}{pT}.$$

Или

$$\Omega = \frac{\omega}{p}. \quad (-1.4)$$

Напомним, что угловая скорость Ω измеряется в радианах в секунду. На практике угловую скорость для электрических машин принято измерять в оборотах в минуту. Пусть n есть угловая скорость вращения магнитного поля, измеряемая в оборотах в минуту. А так как

1 оборот = 2π радиан, а 1 минута = 60 секунд, то

$$n = \frac{60\Omega}{2\pi} = \frac{60\omega}{2\pi p} = \frac{60 \cdot 2\pi f}{2\pi p}.$$

И окончательно получаем для скорости вращения магнитного поля

$$n = \frac{60f}{p}. \quad (-1.5)$$

Приведем возможные значения скорости вращения магнитного поля для трехфазного напряжения промышленной частоты $f = 50$ Гц

| p | n , об/мин |
|-----|--------------|
| 1 | 3000 |
| 2 | 1500 |
| 3 | 1000 |
| 4 | 750 |

2.7. Конструкция устройства, создающего вращающееся магнитное поле.

Размещение вращающегося магнитного поля в ферромагнитной среде (магнитопроводе) позволяет увеличить момент двигателя до 10^6 раз. В настоящее время магнитопровод для многофазной обмотки (рис.15) выполняется в виде кольца (1) с пазами на внутренней цилиндрической поверхности. Так как магнитное поле движется (вращается) относительно магнитопровода, то в нем возникают вихревые токи, вызывающие потери в магнитопроводе. Для уменьшения этих потерь магнитопровод *шхтуеться*, то есть набирается из электрически изолированных друг от друга пластин. Катушки многофазной обмотки (2) укладываются в указанные пазы.

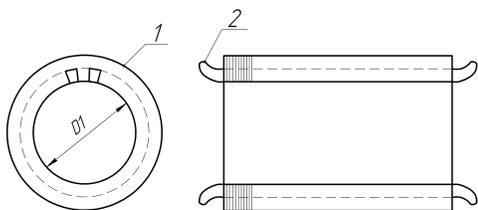


Рис. -1.15: Устройство, создающее вращающееся магнитное поле.

Внешняя часть кольца называется *яро* или *спинка* статора. Участки магнитопровода, расположенные между пазами называются *зубцы*. Все величины, относящиеся к яру (геометрические, магнитные), снабжаются индексом j . Например, магнитная индукция в яре обозначается B_j . Все величины, относящиеся к зубцам, снабжаются индексом z . Например, ширина зубца обозначается b_z . Все величины, относящиеся к пазам снабжаются индексом π . Например, высота паза обозначается h_π . Часть катушки, лежащая в пазу, называется *пазовой* частью катушки, часть катушки, лежащая вне магнитопровода, называется *лобовой* частью катушки.

Для эффективного использования зубцовой части магнитопровода вместо одной сосредоточенной катушки используется *катушечная группа*, состоящая из нескольких, рядом лежащих катушек, сдвинутых друг от друга на один паз и последовательно соединенных друг с другом. Число катушек в катушечной группе обозначается q . Так как число катушечных групп равно p , число фаз m , а у каждой катушки две стороны, то число пазов z равно

$$z = 2mpq .$$

Отсюда число катушек в катушечной группе q называется еще *число пазов на полюс и фазу*.

3. Необходимые сведения об асинхронном двигателе.

Предварительно дадим следующие определения. Неподвижная часть электрической машины называется *статор*. Вращающаяся часть электрической машины называется *ротор*. *Асинхронные машины* получили такое название потому, что в них ротор вращается со скоростью, отличной от скорости вращения магнитного поля. В асинхронных двигателях скорость вращения ротора меньше скорости вращения магнитного поля.

3.1. Устройство асинхронного двигателя.

Статор асинхронного двигателя (рис.15) выполнен так, как это было рассмотрено в разделе 2.7. А именно, он содержит кольцевой магнитопровод (1) с пазами на внутренней цилиндрической поверхности. С целью уменьшения потерь на вихревые токи магнитопровод статора шихтован, то есть набран из электрически изолированных магнитомягких пластин. В пазы магнитопровода уложена трехфазная (в общем случае m -фазная) обмотка (2).

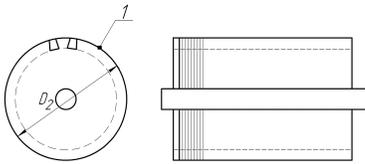


Рис. -1.16: Ротор асинхронного двигателя

Ротор содержит цилиндрический магнитопровод с пазами на внешней поверхности (рис.16). С целью уменьшения потерь на вихревые токи магнитопровод шихтован. В пазы магнитопровода ротора уложена обмотка ротора.

Магнитопровод ротора отделен от магнитопровода статора воздушным зазором. В теории электрических машин принято обозначать длину воздушного зазора между статором и ротором δ . Отсюда

$$D_1 = D_2 + 2\delta.$$

Здесь D_1 – внутренний диаметр магнитопровода статора (как говорят, диаметр расточки статора), D_2 – внешний диаметр магнитопровода ротора³.

³в теории электрических машин принято все величины, относящиеся к статору, снабжать индексом 1, а все величины, относящиеся к ротору, снабжать индексом 2.

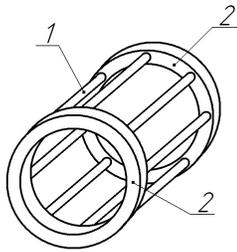


Рис. -1.17: Короткозамкнутая обмотка ротора

С точки зрения преобразования энергии зазор δ должен быть минимальным, поэтому он определяется системой допусков и посадок, наложенных на магнитопроводы статора и ротора.

Существует два вида обмоток ротора. И в зависимости от этого различают два вида роторов.

1. Короткозамкнутый ротор или ротор с короткозамкнутой обмоткой. Короткозамкнутая обмотка (рис.17) выполнена из расположенных в пазах магнитопровода аксиальных стержней (1), замкнутых между собой двумя торцевыми кольцами (2). На рис.17 показана такая обмотка, а магнитопровод при этом не показан. Внешне короткозамкнутая обмотка напоминает *белчью клетку*, поэтому так иногда называют короткозамкнутую обмотку. Стержни и кольца выполняются из меди и ее сплавов.

В ряде случаев короткозамкнутая обмотка выполняется путем заливки пазов расплавленным металлом (алюминием или его сплавами).

2. Фазный ротор или ротор с трехфазной (многофазной) обмоткой (рис.18).

В пазы магнитопровода ротора уложена трехфазная обмотка (1). Вращающаяся вместе с ротором трехфазная обмотка соединена с неподвижной трехфазной нагрузкой (3).

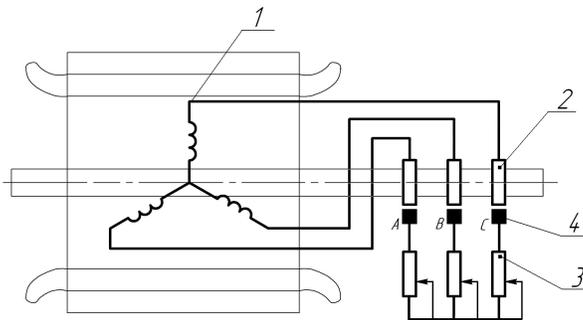


Рис. -1.18: Фазная обмотка ротора

Для этого используется *щеточно-кольцевой узел*. Концы фаз обмотки соединены с вращающимися кольцами (2), установленными на валу ротора. Неподвижная трехфазная нагрузка соединена с неподвижными контактами (4), скользящими по внешней цилиндрической поверхности колец. Контакты называются *щетками*.

3.2. Принцип действия асинхронного двигателя.

Работа асинхронного двигателя основана на следующих явлениях.

1. Вращающееся магнитное поле. Оно было рассмотрено в разделе 2.
2. Явление электромагнитной индукции.

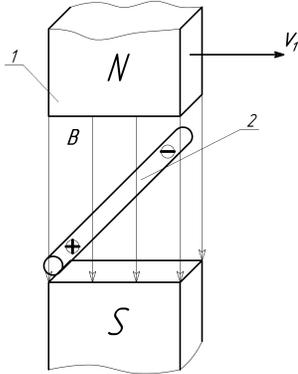


Рис. -1.19: К явлению электромагнитной индукции $v_2 = 0$.

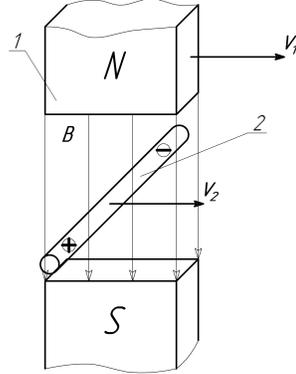


Рис. -1.20: К явлению электромагнитной индукции $v_2 \neq 0$.

Это явление рассмотрим в двух вариантах.

Первый вариант. В движущемся магнитном поле находится неподвижный проводник (рис.19). Тогда в проводнике возникает (индуцируется, наводится) электродвижущая сила.

Пусть B – величина вектора магнитной индукции, l – длина проводника, v_1 – скорость движения магнитного поля, а проводник неподвижен ($v_2 = 0$), тогда индуцируемая ЭДС равна

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -Blv_1, \quad (-1.6)$$

где $\Phi = Blx_1$ – магнитный поток, а x_1 – перемещение магнитного поля.

Рассмотрим другой случай, когда движется и магнитное поле и проводник (рис.20). Пусть v_1 – скорость движения магнитного поля, а v_2 – скорость движения проводника, тогда индуцируемая ЭДС равна

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -Bl(v_1 - v_2), \quad (-1.7)$$

где $\Phi = Bl(x_1 - x_2)$ – магнитный поток, x_1 – перемещение магнитного поля, а x_2 – перемещение проводника. В частном случае, если $v_2 = v_1$, то $e = 0$.

3. Явление Ампера.

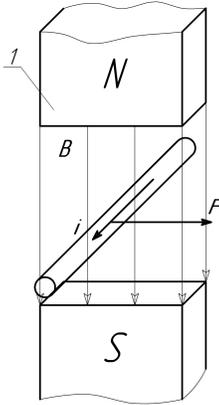


Рис. -1.21: К явлению Ампера

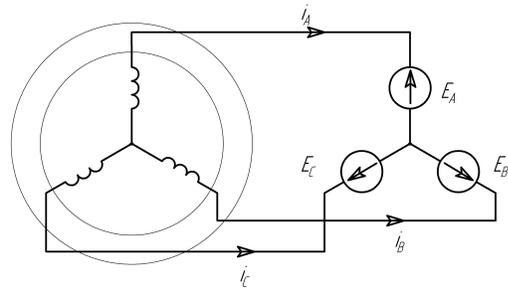


Рис. -1.22: Схема соединения двигателя с трехфазным источником

Оно заключается в том, что на проводник с током в магнитном поле действует сила (рис.21).

Пусть \mathbf{B} – вектор магнитной индукции, i – величина тока в проводнике, \mathbf{l} – вектор, величина которого равна длине проводника, а направление совпадает с направлением тока. Тогда сила, действующая на проводник, (сила Ампера) равна

$$\mathbf{F} = i \cdot [\mathbf{l}, \mathbf{B}],$$

где квадратные скобки означают векторное произведение векторов \mathbf{l} и \mathbf{B} .

На основании указанных явлений можно объяснить принцип действия асинхронного двигателя. Пусть сначала ротор неподвижен $n_2 = 0$. Такой режим работы двигателя называется режимом *пуска*.

После подключения трехфазной обмотки статора к источнику трехфазного напряжения (рис.22) возникает вращающееся магнитное поле.

Скорость вращения магнитного поля равна⁴

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}.$$

Ей соответствует линейная скорость v_1 движения магнитного поля относительно проводников обмотки ротора. В соответствии с явлением электромагнитной индукции в проводниках обмотки ротора наводится ЭДС. Ее величина определяется соотношением (-1.6). Частота этой ЭДС равна частоте f_1 трехфазного напряжения. Действующее значение ЭДС, наводимой в фазе обмотки в режиме пуска, может быть записано следующим образом

$$E_{2н} = 4,44f_1w_2k_{о62}\Phi. \quad (-1.8)$$

Здесь w_2 – число витков в фазе обмотки ротора, $k_{о62}$ – обмоточный коэффициент обмотки ротора, Φ – магнитный поток.

Под действием ЭДС в обмотке ротора возникает ток (рис.23). Частота тока в роторе также равна f_1 .

В соответствии с явлением Ампера на стержни с током, находящиеся во вращающемся магнитном поле, действует сила (рис.24). Силы, действующие на проводники обмотки ротора, создают вращающий момент, направление которого совпадает с направлением вращения магнитного поля. Под действием этого момента ротор приводится во вращение.

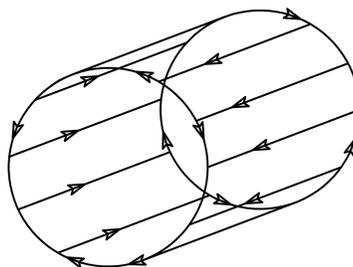


Рис. -1.23: Токи в короткозамкнутой обмотке

Теперь пусть скорость вращения ротора достигла значения $n_2 < n_1$. Ей соответствует линейная скорость движения стержней v_2 . В соответствии с явлением электромагнитной индукции в проводниках обмотки ротора также наводится ЭДС. Ее величина определяется соотношением (-1.2). Частота этой ЭДС равна

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n_2)}{60},$$

где $(n_1 - n_2)$ - скорость вращения поля относительно вращающегося ротора. Действующее значение ЭДС, наводимой в фазе обмотки может быть

⁴Смотрите предыдущий раздел.

записано следующим образом

$$E_2 = 4,44f_2w_2k_{\phi 2}\Phi .$$

Под действием ЭДС в обмотке ротора возникает ток. На проводники с током обмотки ротора, находящиеся во вращающемся магнитном поле, действует сила. Силы, действующие на проводники обмотки ротора, создают вращающий момент, под действием которого ротор продолжает вращение. То есть, с увеличением скорости вращения ротора частота и амплитуда ЭДС уменьшается. Соответственно уменьшается частота токов в проводниках обмотки ротора.

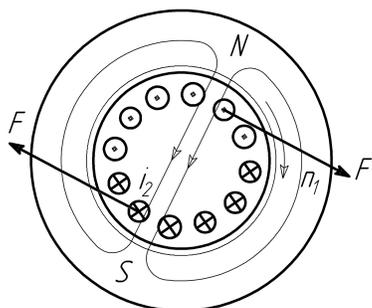


Рис. -1.24: Вращающий момент асинхронного двигателя

Допустим, что ротор разогнался до скорости $n_2 = n_1$. Тогда вращающееся магнитное поле неподвижно относительно вращающегося ротора. ЭДС, наводимая в обмотке ротора, равна нулю, соответственно ток в фазах обмотки ротора равен нулю и вращающий момент, развиваемый двигателем, равен нулю. Такой режим называется режимом *идеального холостого хода*. Таким образом, для создания двигателем вращающего момента необходимо, чтобы скорость вращения ротора была меньше скорости вращения магнитного поля. Именно благодаря этой особенности рассматриваемый двигатель был назван *асинхронным*.

Для характеристики вращения магнитного поля относительно ротора вводится величина

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} ,$$

которая называется *скольжением*. В режиме пуска, когда ротор неподвижен, $s = 1$. В режиме идеального холостого хода, когда $n_1 = n_2$, $s = 0$. Используя скольжение, можно записать

$$n_1 - n_2 = s \cdot n_1 ,$$

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n_2)}{60} = s \cdot f_1 ,$$

$$E_2 = 4,44f_2w_2k_{\phi 2}\Phi = s \cdot E_{2п} .$$

3.3. Баланс мощности в асинхронном двигателе.

Для асинхронного двигателя имеет место баланс мощности: мощность, потребляемая асинхронным двигателем из источника, равна потерям мощности в конструктивных элементах асинхронного двигателя и в нагрузке, приводимой им в движение. Прежде всего мы будем говорить о балансе активной мощности.

Баланс мощности иллюстрируется *диаграммой мощности*, которая символически изображается как трубопровод с ответвлениями (рис.25).

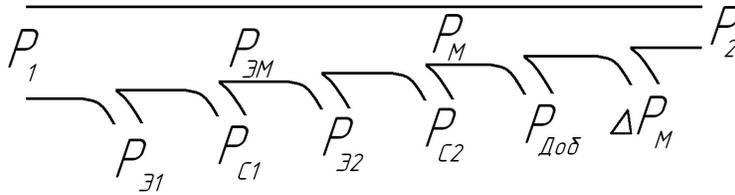


Рис. -1.25: Диаграмма мощности асинхронного двигателя.

Здесь

- мощность, потребляемая асинхронным двигателем из сети,

$$P_1 = m_1 U_1 \cdot I_1 \cos \varphi_1, \quad (-1.9)$$

- потери в активном сопротивлении обмотки статора

$$P_{\text{Э1}} = m_1 I_1^2 \cdot R_1,$$

эта мощность рассеивается в виде тепла в указанной обмотке,

- потери в магнитопроводе (в стали) статора асинхронного двигателя

$$P_{\text{С1}} = P_{\text{В1}} + P_{\text{Г1}},$$

они складываются из потерь на вихревые токи $P_{\text{В1}}$ и потерь на перемагничивание (на гистерезис) $P_{\text{Г1}}$, эта мощность рассеивается в виде тепла в магнитопроводе статора асинхронного двигателя.

- Разницу

$$P_1 - P_{\text{Э1}} - P_{\text{С1}}$$

называют *электромагнитной мощностью* и обозначают $P_{\text{ЭМ}}$. Эта мощность передается из статора в ротор через воздушный зазор.

- Потери в активном сопротивлении обмотки ротора асинхронного двигателя

$$P_{\varepsilon 2} = m_2 R_2 \cdot I_2^2,$$

эта мощность рассеивается в виде тепла в обмотке ротора.

- Потери в магнитопроводе (в стали) ротора асинхронного двигателя

$$P_{c2} = P_{в2} + P_{г2},$$

они складываются из потерь на вихревые токи $P_{в2}$ и потерь на перемагничивание (на гистерезис) $P_{г2}$, эта мощность рассеивается в виде тепла в магнитопроводе ротора асинхронного двигателя. Как указывалось, эти потери уменьшаются с увеличением скорости вращения ротора.

- Разность

$$P_{\varepsilon \text{м}} - P_{\varepsilon 2} - P_{c2} \quad (-1.10)$$

обозначается $P_{\text{м}}$ и называется *механической мощностью*, поступающей на вал асинхронного двигателя. Она расходуется на потери в стали якоря, добавочные потери, механические потери и полезную механическую мощность.

- Далее необходимо учесть, что часть механической мощности тратится на трение в подшипниках и на вентиляцию. Эту часть обозначим $\Delta P_{\text{м}}$ и будем называть *механические потери*.
- Добавочные потери $P_{\text{доб}}$ включают в себя все виды трудно учитываемых потерь, вызванных действием высших гармоник МДС, пульсацией магнитного потока и другими причинами. В соответствии с ГОСТом принимают $P_{\text{доб}} = 0.005 P_1$.
- Полезная механическая мощность

$$P_2 = M_2 \Omega_2, \quad (-1.11)$$

где M_2 – полезный вращающий момент на валу двигателя, Ω_2 – угловая скорость вращения ротора в рад/сек.

В результате баланс мощности для асинхронного двигателя имеет вид

$$P_1 = P_{\text{э1}} + P_{\text{с1}} + P_{\text{э2}} + P_{\text{с2}} + P_{\text{доб}} + \Delta P_{\text{м}} + P_2. \quad (-1.12)$$

Отсюда следует, что механическая мощность двигателя равна

$$P_{\text{м}} = P_{\text{эм}} - P_{\text{э2}} - P_{\text{с2}} = P_{\text{доб}} + \Delta P_{\text{м}} + P_2. \quad (-1.13)$$

Отношение

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 \quad (-1.14)$$

есть коэффициент полезного действия асинхронного двигателя.

3.4. Вращающий момент асинхронного двигателя.

Момент двигателя можно сосчитать путем суммирования моментов от сил (сил Ампера), действующих на проводники с током обмотки ротора во вращающемся магнитном поле. Однако в теории электрических машин используется расчет вращающего момента, исходя из мощности, передаваемой на ротор.

Напомним, что механическая работа, совершаемая вращающимся телом (ротором) под действием вращающего момента M равна

$$A = M \cdot \alpha_2,$$

где α_2 – угол поворота тела (ротора). Отсюда механическая мощность равна

$$P_{\text{м}} = M \cdot \frac{\alpha_2}{t} = M \cdot \Omega_2.$$

отсюда

$$M = \frac{P_{\text{м}}}{\Omega_2}.$$

Примем без доказательства следующее выражение для вращающего момента асинхронного двигателя⁵

$$M = \frac{pm_2 U_1^2}{2\pi f_1 (X_2^2 + \frac{R_2^2}{s^2})} \cdot \frac{R_2}{s}. \quad (-1.15)$$

⁵С выводом этой формулы можно познакомиться в книге А.И. Вольдека ЛЗ.

Здесь p – число пар полюсов обмоток статора и ротора, m_2 – число фаз обмотки ротора, U_1 – величина напряжения питания двигателя, f_1 – частота напряжения питания двигателя, X_2 – индуктивное сопротивление обмотки ротора, R_2 – активное сопротивление обмотки ротора, s – скольжение.

Из (-1.11) следует выражение для полезного вращающего момента

$$M_2 = \frac{60 P_2}{2\pi n_2} = 9,55 \cdot \frac{P_2}{n_2}. \quad (-1.16)$$

Из выражения для механической мощности (-1.13) следует

$$\frac{P_M}{n_2} = \frac{P_2}{n_2} + \frac{P_{\text{доб}} + \Delta P_M}{n_2}. \quad (-1.17)$$

Отсюда получаем

$$M = M_2 + \Delta M, \quad (-1.18)$$

где ΔM момент, расходуемый на дополнительные потери и механические потери.

В режиме пуска $\Delta M = 0$, поэтому

$$M_{\text{п}} = M_{2\text{п}}. \quad (-1.19)$$

Этим соотношением мы воспользуемся для расчета вращающего момента в режиме пуска $M_{2\text{п}}$.

3.5. Механическая характеристика асинхронного двигателя. Формула Клосса.

Зависимость вращающего момента от скольжения $M(s)$ а также зависимость скорости вращения ротора от момента $n_2(M)$ называются *механической характеристикой* асинхронного двигателя. Указанные характеристики однозначно связаны между собой, так как

$$n_2 = (1 - s) \frac{60f_1}{p} = (1 - s)n_1. \quad (-1.20)$$

Зависимость $M(s)$ строится на основании выражения (-1.15), она показана на рис.26. Ей соответствует зависимость $n_2(M)$, показанная на рис.27.

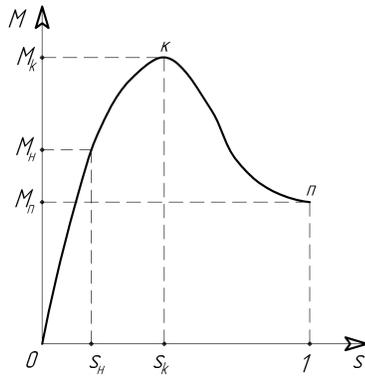


Рис. -1.26: Механическая характеристика асинхронного двигателя $M(s)$

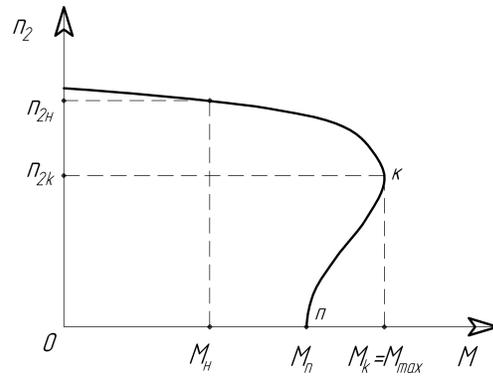


Рис. -1.27: Механическая характеристика асинхронного двигателя $n_2(M)$.

Точка "о" механической характеристики соответствует режиму идеального холостого хода асинхронного двигателя

$$M = 0, \quad s = 0, \quad n_2 = n_1 = \frac{60f_1}{p}.$$

Точка "н" механической характеристики соответствует *номинальному* режиму работы асинхронного двигателя⁶

$$M = M_n, \quad s = s_n, \quad n_2 = (1 - s_n) \frac{60f_1}{p}.$$

Точка "к" механической характеристики соответствует *критическому* режиму работы асинхронного двигателя

$$M = M_k \text{ (максимальному моменту)}, \quad s = s_k, \quad n_2 = (1 - s_k) \frac{60f_1}{p}.$$

Точка "п" механической характеристики соответствует режиму пуска асинхронного двигателя

$$M = M_n, \quad s = 1, \quad n_2 = 0.$$

⁶Номинальным называется наиболее часто встречающийся режим, на который рассчитан асинхронный двигатель.

Из формулы (-1.15) следует выражение для пускового момента

$$M = \frac{pm_2U_1^2}{\omega_1(X_{s_2}^2 + R_2^2)} \cdot R_2. \quad (-1.21)$$

Участок "ок" механической характеристики соответствует устойчивой работе асинхронного двигателя. На нем производная $dM/ds > 0$ и уменьшение скорости вращения приводит к увеличению вращающего момента. Участок "кп" механической характеристики соответствует неустойчивой работе асинхронного двигателя. На нем производная $dM/ds < 0$ и попытка получить увеличение вращающего момента с уменьшением скорости вращения приводит к дополнительному уменьшению вращающего момента и торможению асинхронного двигателя до его остановки.

Формула Клосса. Исследование механической характеристики $M(s)$ на экстремум позволяет записать эту характеристику через параметры критической точки M_k, s_k . Запишем зависимость $M(s)$ (-1.15) в следующем виде

$$M = \frac{K}{X_2^2 + \frac{R_2^2}{s^2}} \cdot \frac{R_2}{s}, \quad (-1.22)$$

где

$$K = \frac{pm_2U_1^2}{\omega_1},$$

и исследуем полученное соотношение на экстремум, то есть, решим уравнение $dM/ds = 0$. Получим

$$-1 + \frac{1}{X_2^2 + \frac{R_2^2}{s_k^2}} \cdot 2 \cdot \frac{R_2^2}{s_k^2} = 0.$$

Отсюда

$$s_k = \frac{R_2}{X_2}. \quad (-1.23)$$

Подставляя это соотношение в (-1.22), получим выражение для максимального момента

$$M_k = \frac{K}{2X_2} = \frac{pm_2U_1^2}{2\omega_1X_2}, \quad (-1.24)$$

используя которое, найдем

$$\frac{M}{M_k} = \frac{2}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}}.$$

Отсюда получаем выражение для механической характеристики асинхронного двигателя

$$M = \frac{2M_k}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}}, \quad (-1.25)$$

которое называется формулой Клосса. Оно удобно тем, что зависит только от двух параметров и позволяет записать механическую характеристику через значения момента и скольжения для двух режимов работы асинхронного двигателя, например, для номинального и критического режимов, или для номинального и пускового режимов.

3.6. Регулирование скорости вращения асинхронного двигателя.

Необходимость регулирования скорости вращения связана с требованиями оборудования, использующего асинхронный привод.

Из выражения для механической характеристики асинхронного двигателя (-1.15) четыре возможных способа регулирования скорости вращения:

- изменение частоты питания f_1 – частотное регулирование;
- изменение числа полюсов обмотки статора $2p$;
- изменение напряжения U_1 ;
- изменение активного сопротивления обмотки ротора R_2 .

Регулирование скорости вращения изменением активного сопротивления обмотки ротора.

Этот способ применим только для асинхронных двигателей с фазным ротором, который имеет щеточно-кольцевой узел для подключения добавочных сопротивлений R_d .

Для рассматриваемого способа регулирования максимальный момент (-1.24) остается неизменным, а критическое скольжение (-1.23) возрастает. Отсюда механические характеристики для различных добавочных сопротивлений имеют вид, показанный на рис.28 и рис.29. Механическая характеристика для $R_d = 0$ называется *естественной*, механическая характеристика для $R_d \neq 0$ называется *искусственной*. Увеличение добавочного сопротивления приводит к уменьшению скорости вращения.

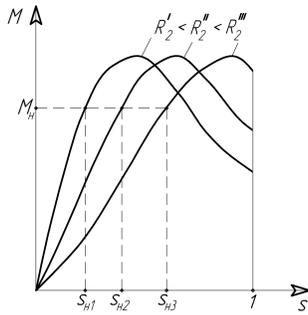


Рис. -1.28: Механические характеристики при изменении сопротивления обмотки ротора.

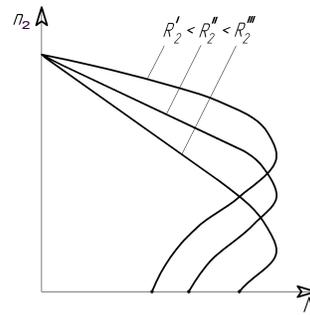


Рис. -1.29: Механические характеристики при изменении сопротивления обмотки ротора.

Диапазон регулирования в этом случае выше, чем при регулировании напряжения.

Этот способ позволяет регулировать скорость вращения плавно и в широком диапазоне. Недостатками способа являются неэкономичность из-за больших потерь в добавочном сопротивлении и большой наклон механических характеристик при больших добавочных сопротивлениях, что приводит к недопустимым изменениям скорости вращения при небольших изменениях момента нагрузки.

Сравнивая рассмотренные способы регулирования скорости вращения асинхронного двигателя, нужно отдать предпочтение частотному способу регулирования как наиболее экономичному и позволяющему плавно и в широком диапазоне регулировать скорость вращения. Частотно-регулируемый привод с короткозамкнутым асинхронным двигателем находит широкое применение в технике.

4. Примеры расчета.

4.1. Пример расчета. Вариант №6

Трехфазный ($m_1 = 3$) асинхронный двигатель с фазным ротором, обмотка ротора которого соединена звездой, а номинальная полезная мощность которого равна $P_{2н} = 55 \cdot 10^3$ Вт, включен в сеть с номинальным напряжением $U_{1н} = 220$ В и частотой $f_1 = 50$ Гц. Скорость вращения

ротора в номинальном режиме $n_{2н} = 960$ об/мин. Коэффициент полезного действия двигателя в номинальном режиме $\eta_n = 89\%$. Косинус угла нагрузки, с которым двигатель работает в номинальном режиме, $\cos \varphi_n = 0,86$. Число пар полюсов обмотки статора $p = 3$. Кроме того задано отношение максимального момента двигателя к его пусковому моменту $M_k/M_n = 1,8$.

Определить:

- номинальный ток статора $I_{1н}$,
- полные потери двигателя при номинальной нагрузке ($P_{1н} - P_{2н}$),
- построить естественную механическую характеристику $n_2(M)$.

1. Номинальный ток статора $I_{1н}$ определяется из соотношения (-1.9)

$$I_{1н} = \frac{P_{1н}}{m_1 U_{1н} \cdot \cos \varphi_{1н}} = \frac{55 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0,86} = 97 \text{ А}.$$

2. Полные потери двигателя при номинальной нагрузке $P_{1н} - P_{2н}$. Здесь мощность $P_{1н}$, потребляемая двигателем, задана.

2.1. Полезная механическая мощность $P_{2н}$ определяется из соотношения (-1.14)

$$P_{2н} = \eta_n \cdot P_{1н} = 0,89 \cdot 55 \cdot 10^3 = 49 \cdot 10^3 \text{ Вт}.$$

2.2. Отсюда полные потери двигателя при номинальной нагрузке

$$P_{1н} - P_{2н} = (55 - 49) \cdot 10^3 \text{ Вт}.$$

3. Построение естественной⁷ механической характеристики $n_2(M)$. Сначала построим механическую характеристику в координатах $M(s)$ в соответствии с формулой Клосса (-1.25)

$$M = \frac{2M_k}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}}.$$

Эта характеристика определена, если определить величину максимального момента M_k и величину скольжения, соответствующего этому моменту s_k . Для определения величины скольжения s_k воспользуемся тем,

⁷Механическая характеристика называется естественной, если она соответствует нулевому добавочному сопротивлению в цепи обмотки ротора.

что отношение максимального момента двигателя к его пусковому моменту задано $M_k/M_{\Pi} = 1,8$. При этом учтем, что формула Клосса для режима пуска, когда $M = M_{\Pi}$ и $s = 1$, дает

$$M_{\Pi} = \frac{2M_{\text{к}}}{s_{\text{к}} + \frac{1}{s_{\text{к}}}}.$$

Отсюда следует уравнение для определения критического скольжения $s_{\text{к}}$

$$s_{\text{к}}^2 - 2\frac{M_{\text{к}}}{M_{\Pi}}s_{\text{к}} + 1 = 0.$$

Так как скольжение изменяется в пределах от 0 до 1, то физический смысл имеет только одно решение

$$s_{\text{к}} = \frac{M_{\text{к}}}{M_{\Pi}} - \sqrt{\left(\frac{M_{\text{к}}}{M_{\Pi}}\right)^2 - 1}$$

3.1. В нашем случае критическое скольжение $s_{\text{к}}$ равно

$$s_{\text{к}} = \frac{M_{\text{к}}}{M_{\Pi}} - \sqrt{\left(\frac{M_{\text{к}}}{M_{\Pi}}\right)^2 - 1} = 1,8 - \sqrt{1,8^2 - 1} = 0,3.$$

Максимальный момент $M_{\text{к}}$ определим из формулы Клосса (-1.25) для номинального режима

$$M_{\text{н}} = \frac{2M_{\text{к}}}{\frac{s_{\text{к}}}{s_{\text{н}}} + \frac{s_{\text{н}}}{s_{\text{к}}}}.$$

Отсюда

$$M_{\text{к}} = \frac{1}{2}M_{\text{н}} \cdot \left(\frac{s_{\text{к}}}{s_{\text{н}}} + \frac{s_{\text{н}}}{s_{\text{к}}}\right).$$

3.2. В этом выражении $M_{\text{н}}$ определяется из выражения (-1.16)

$$M_{\text{н}} = M_{2\text{н}} = 9,55 \cdot \frac{P_{2\text{н}}}{n_{2\text{н}}} = 9,55 \cdot \frac{49 \cdot 10^3}{960} = 487 \text{ Н м}.$$

3.3. Номинальное скольжение $s_{\text{н}}$ определяется из соотношения (-1.20)

$$s_{\text{н}} = \frac{n_1 - n_{2\text{н}}}{n_1} = \frac{1000 - 960}{1000} = 0,04.$$

3.4. Здесь n_1 скорость вращения магнитного поля определяется в соответствии с (-1.5)

$$n_1 = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000 \text{ об/мин.}$$

3.5. Используя найденные величины, определяем максимальный момент M_K

$$M_K = \frac{1}{2} M_H \cdot \left(\frac{s_K}{s_H} + \frac{s_H}{s_K} \right) = \frac{1}{2} 487 \cdot \left(\frac{0,3}{0,04} + \frac{0,04}{0,3} \right) = 1852 \text{ Н м.}$$

3.6. В результате уравнение механической характеристики $M(s)$ имеет вид

$$M = \frac{2M_K}{\frac{s_K}{s} + \frac{s}{s_K}} = \frac{3704}{\frac{0,3}{s} + \frac{s}{0,3}}.$$

3.7. Используя вышеприведенную функцию, вычислим координаты точек механической характеристики $n_2(M)$ в соответствии с таблицей 4.

Таблица 4.

| | | | | | | |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|
| s | 0,0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1,0 |
| M | 0 | 1715 | 1781 | 1482 | 1218 | 1028 |
| $n_2 = (1 - s)n_1$ | 1000 | 800 | 600 | 400 | 200 | 0 |

По вычисленным координатам строится естественная механическая характеристика $n_2(M)$.

4.2. Пример расчета. Вариант №26

Трехфазный ($m_1 = 3$) асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, номинальная полезная мощность которого $P_{2H} = 800$ Вт, включен в сеть с номинальным напряжением $U_{1H} = 220$ В и частотой $f_1 = 50$ Гц. Скольжение ротора в номинальном режиме $s_H = 3$ %. Коэффициент полезного действия двигателя в номинальном режиме $\eta_H = 0,78$. Косинус угла нагрузки, с которым двигатель работает в номинальном режиме, $\cos \varphi_H = 0,86$. Число пар полюсов обмотки статора $p = 1$. Кроме того заданы отношение максимального момента двигателя к его пусковому

моменту $M_k/M_{\Pi} = 2,2$, отношение пускового момента двигателя к его номинальному моменту $M_k/M_{\Pi} = 1,9$ а также отношение пускового тока двигателя к его номинальному току $I_{\Pi}/I_{\text{н}} = 7,0$.

Определить:

- номинальный $I_{\text{н}}$ и пусковой I_{Π} токи, номинальный $M_{\text{н}}$, пусковой M_{Π} и максимальный $M_{\text{к}}$ моменты.
- Как изменится пусковой момент двигателя при снижении напряжения на его зажимах на 15% и возможен ли пуск двигателя при этих условиях с номинальной нагрузкой?

1. Номинальный ток $I_{\text{н}}$ определяется из соотношения (-1.17)

$$I_{1\text{н}} = \frac{P_{1\text{н}}}{m_1 U_{1\text{н}} \cdot \cos \varphi_{1\text{н}}} .$$

1.1. Потребляемую двигателем мощность $P_{1\text{н}}$, определим из соотношения (-1.14)

$$P_{1\text{н}} = \frac{P_{2\text{н}}}{\eta_{\text{н}}} = \frac{800}{0,78} = 1025 \text{ Вт} .$$

1.2. Номинальный ток $I_{\text{н}}$

$$I_{1\text{н}} = \frac{P_{1\text{н}}}{m_1 U_{1\text{н}} \cdot \cos \varphi_{1\text{н}}} = \frac{1025}{3 \cdot 220 \cdot 0,86} = 1,8 \text{ А} .$$

2. Пусковой I_{Π} ток определяется из соотношения

$$I_{1\Pi} = I_{1\text{н}} \cdot \frac{I_{\Pi}}{I_{\text{н}}} = 1,8 \cdot 7,0 = 12,6 \text{ А} .$$

3. Номинальный полезный момент $M_{2\text{н}}$ определяется из соотношения (-1.16)

$$M_{2\text{н}} = 9,55 \cdot \frac{P_{2\text{н}}}{n_{2\text{н}}} .$$

Номинальная скорость вращения ротора $n_{2\text{н}}$ определяется из соотношения (-1.20)

$$n_{2\text{н}} = (1 - s_{\text{н}}) \cdot n_1 .$$

Здесь номинальное скольжение задано $s_{\text{н}} = 0,03$, а скорость вращения магнитного поля n_1 определяется из соотношения (-1.5).

3.1. Скорость вращения магнитного поля n_1

$$n_1 = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{1} = 3000 \text{ об/мин.}$$

3.2. Отсюда номинальная скорость вращения ротора $n_{2н}$

$$n_{2н} = (1 - s_n) \cdot n_1 = 0,97 \cdot 3000 = 2910 \text{ об/мин.}$$

3.3. В результате номинальный полезный момент $M_{2н}$

$$M_{2н} = 9,55 \cdot \frac{P_{2н}}{n_{2н}} = 9,55 \cdot \frac{800}{2910} = 2,62 \text{ Н м.}$$

4. Пусковой момент $M_{п}$ определяется из соотношения

$$M_{п} = M_{2н} \cdot \frac{M_{п}}{M_{2н}} = 2,62 \cdot 1,9 = 4,98 \text{ Н м.}$$

5. максимальный момент $M_{к}$ определяется из соотношения

$$M_{к} = M_{п} \cdot \frac{M_{к}}{M_{п}} = 4,98 \cdot 2,2 = 10,95 \text{ Н м.}$$

6. Пусковой момент двигателя при снижении напряжения на его зажимах на 15%. Из соотношения (-1.15) следует, что отношение моментов для различных напряжений пропорционально отношению квадратов напряжений. Таким образом,

$$\frac{M_{п}(0,85 \cdot U_{1н})}{M_{п}(U_{1н})} = \frac{0,85^2 \cdot U_{1н}^2}{U_{1н}^2}.$$

Отсюда пусковой момент двигателя при снижении напряжения на его зажимах на 15%

$$M_{п}(0,85 \cdot U_{1н}) = 0,85^2 \cdot M_{п}(U_{1н}) = 0,85^2 \cdot 4,98 = 3,6 \text{ Н м.}$$

7. Возможен ли пуск двигателя при этих условиях с номинальной нагрузкой следует из сравнения пускового момента $M_{п}(0,85 \cdot U_{1н}) = 3,6 \text{ Н м}$ и номинального момента $M_{2н} = 2,62 \text{ Н м}$. Так как указанный пусковой момент превосходит номинальный, то пуск двигателя с номинальной нагрузкой возможен.

Список литературы

- [1] А.С. Касаткин, М.В. Немцов. Электротехника. Учебник для студентов высших технических учебных заведений., Энергия, 2000, 496с.
- [2] И.П. Копылов. Электрические машины. Учебник для вузов. М., Энергоатомиздат, 1986, 360с.
- [3] А.И. Вольдек. Электрические машины. Учебник для студентов высших технических учебных заведений., Л., Энергия, 1974, 840с.

Кецарис Александр Августинovich
Полякова Валентина Николаевна

Трехфазный асинхронный двигатель.

Учебное пособие по курсу «Общая электротехника»
Подписано в печать Заказ № Тираж 100

Типография МАМИ, Москва, 105023, Б.Семеновская, 38