

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  $\eta_n$ . 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	$\eta_{н}$ %	$\cos \varphi_{н}$	$M_k/M_{п}$	$p$
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.

Трехфазный 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  $s_{н}$ . Коэффициент полезного действия двигателя в номинальном режиме равен  $\eta_{н}$ . Косинус угла нагрузки, с которым двигатель работает в номинальном режиме, равен  $\cos \varphi_{н}$ . Число пар

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

- номинальный  $I_n$  и пусковой  $I_{\pi}$  токи, номинальный  $M_n$ , пусковой  $M_{\pi}$  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.	$U_{1н}$ В	$P_{2н}$ кВт	$s_{н}$ %	$\eta_{н}$	$\cos \varphi_{н}$	$p$	$M_k/M_{п}$	$M_{п}/M_{н}$	$I_{п}/I_{н}$
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 преобразова-

нии.

## 2.1. Общее представление о вращающемся магнитном поле.

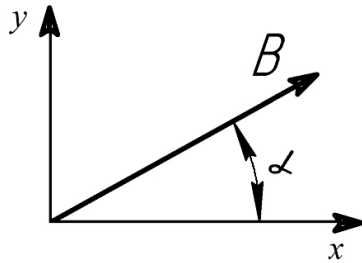


Рис. -1.1: Вращение вектора магнитной индукции.

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  $\alpha$  с осью абсцисс. Координаты вектора магнитной индукции записываются следующим образом

$$B_x = B \cos \alpha$$

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

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  $\Omega$  - 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*.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup>Таким 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.<sup>2</sup> 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.

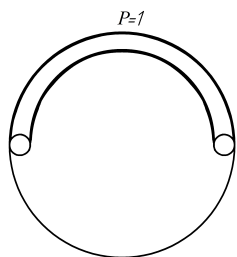


Рис. -1.2: Катушка фазы обмотки статора  $k = 1$ .

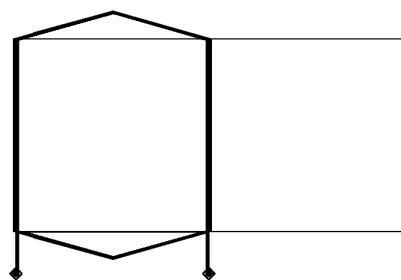


Рис. -1.3: Развертка фазы обмотки статора  $k = 1$ .

1.  $k = 1$ , рис.2, рис.3,

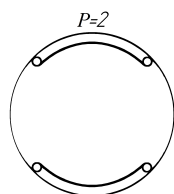


Рис. -1.4: Две катушки фазы обмотки статора  $k = 2$ .

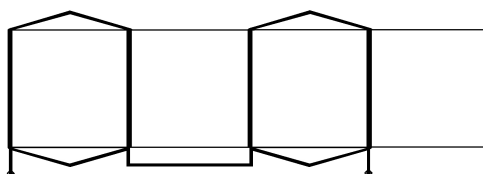


Рис. -1.5: Развертка фазы обмотки статора  $k = 2$ .

2.  $k = 2$ , рис.4, рис.5,

---

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

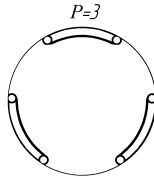


Рис. -1.6: Три катушки фазы обмотки статора  $k = 3$ .

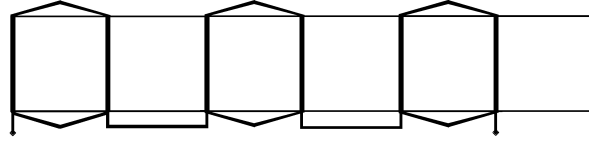


Рис. -1.7: Развертка фазы обмотки статора  $k = 3$ .

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.

$k$	$\alpha_0$ , рад	$\alpha_0$ , 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.

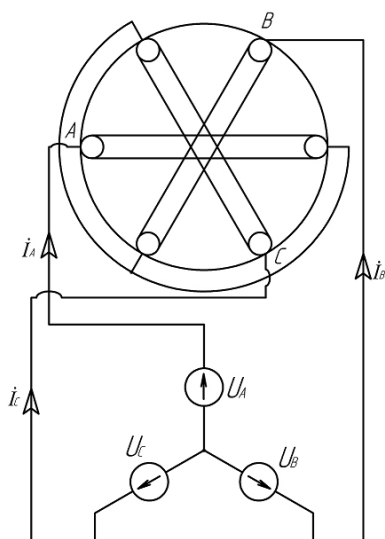


Рис. -1.8: Схема соединения фаз обмотки к фазам источника.

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.

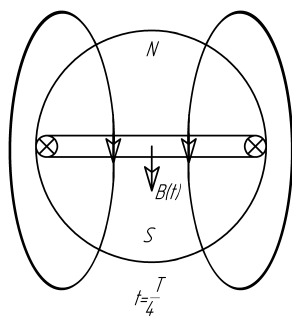


Рис. -1.9: Катушка фазы обмотки статора  $k = 1$ .

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-

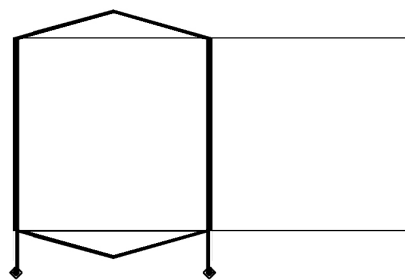


Рис. -1.10: Развертка фазы обмотки статора  $k = 1$ .

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.

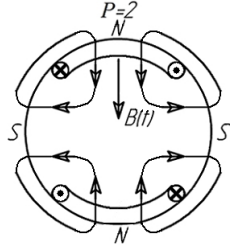


Рис. -1.11: Две катушки фазы обмотки статора  $k = 2$ .

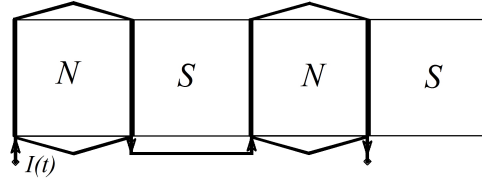


Рис. -1.12: Развертка фазы обмотки статора  $k = 2$ .

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  $f$ .

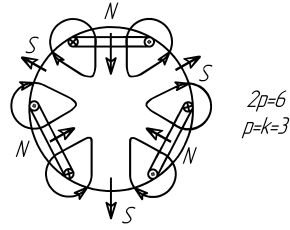


Рис. -1.13: Три катушки фазы обмотки статора  $k = 3$ .

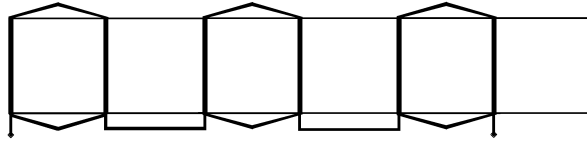


Рис. -1.14: Развертка фазы обмотки статора  $k = 3$ .

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 шестиполусным. 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

$$p = k, \quad (-1.2)$$

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

$$\alpha_0 = \frac{2\pi}{3p}. \quad (-1.3)$$

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  $\Omega$  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 =  $2\pi$  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  $f = 50\text{Гц}$

$p$	$n$ , 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 *шихтуется*, то есть набирается из электрически изолированных друг от друга пластин. Катушки многофазной обмотки (2) укладываются в указанные пазы.

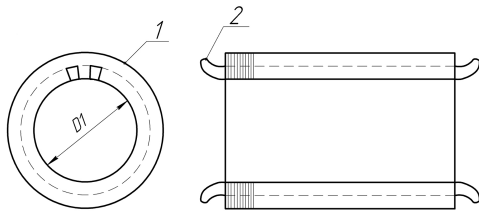


Рис. -1.15: Устройство, создающее вращающееся магнитное поле.

Внешняя часть кольца называется *ярмо* или *спинка* статора. Участки магнитопровода, расположенные между пазами называются *зубцы*. Все величины, относящиеся к ярму (геометрические, магнитные), снабжаются индексом  $j$ . Например, магнитная индукция в ярме обозначается  $B_j$ . Все величины, относящиеся к зубцам, снабжаются индексом  $z$ . Например, ширина зубца обозначается  $b_z$ .

Все величины, относящиеся к пазам снабжаются индексом  $\pi$ . Например, высота паза обозначается  $h_\pi$ . 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).

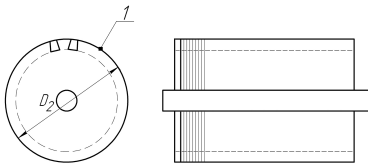


Рис. -1.16: Ротор асинхронного двигателя

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  $\delta$ . Отсюда

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

Здесь  $D_1$  – внутренний диаметр магнитопровода статора (как говорят, диаметр расточки статора),  $D_2$  – внешний диаметр магнитопровода ротора<sup>3</sup>.

---

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



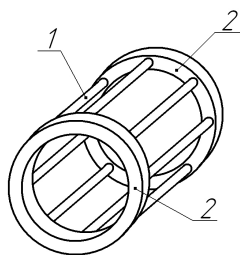


Рис. -1.17: Короткозамкнутая обмотка ротора

С точки зрения преобразования энергии зазор  $\delta$  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).

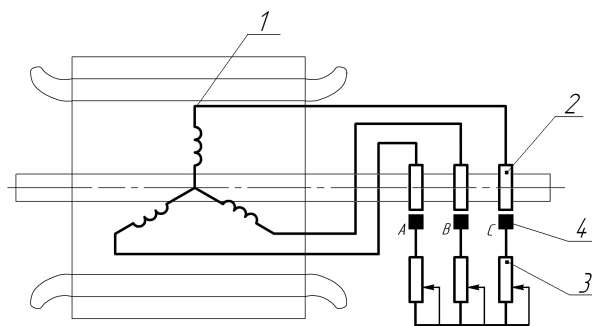


Рис. -1.18: Фазная обмотка ротора

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.

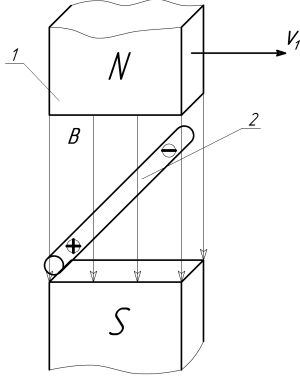


Рис. -1.19: К явлению электромагнитной индукции  $v_2 = 0$ .

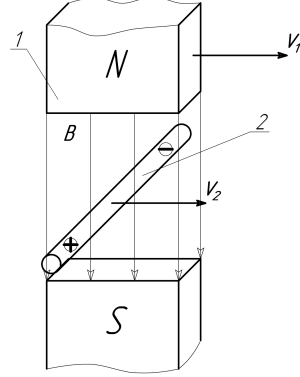


Рис. -1.20: К явлению электромагнитной индукции  $v_2 \neq 0$ .

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.

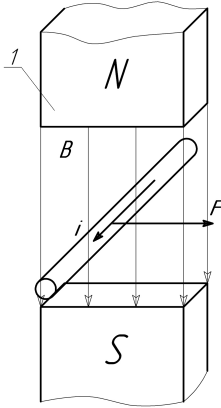


Рис. -1.21: К явлению Ампера

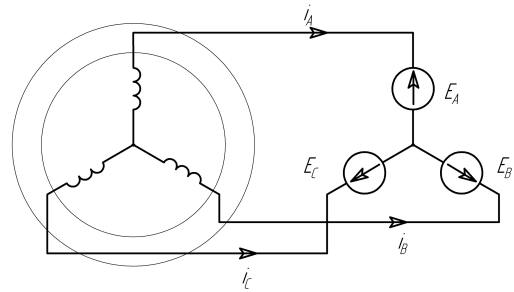


Рис. -1.22: Схема соединения двигателя с трехфазным источником

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 равна<sup>4</sup>

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

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

$$E_{2н} = 4,44f_1w_2k_{об2}\Phi. \quad (-1.8)$$

Здесь  $w_2$  – число витков в фазе обмотки ротора,  $k_{об2}$  – обмоточный коэффициент обмотки ротора,  $\Phi$  – 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.

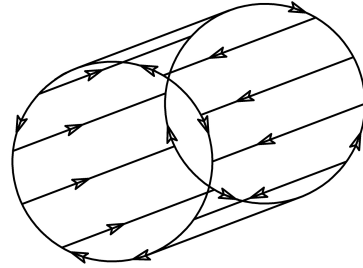


Рис. -1.23: Токи в короткозамкнутой обмотке

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

<sup>4</sup>Смотрите предыдущий раздел.

записано следующим образом

$$E_2 = 4,44f_2w_2k_{o62}\Phi.$$

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.

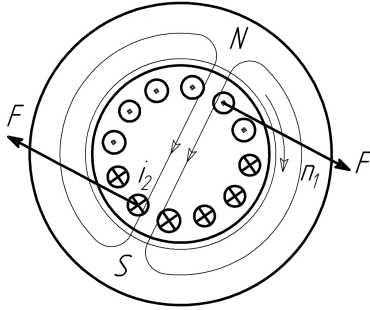


Рис. -1.24: Вращающий момент асинхронного двигателя

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

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

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

$$E_2 = 4,44f_2w_2k_{o62}\Phi = s \cdot E_{2п}.$$

### 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).

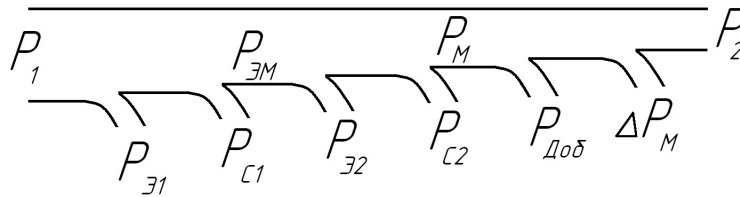


Рис. -1.25: Диаграмма мощности асинхронного двигателя.

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

$$P_{э1} = m_1 I_1^2 \cdot R_1,$$

эта мощность рассеивается в виде тепла в указанной обмотке,

- потери в магнитопроводе (в стали) статора асинхронного двигателя

$$P_{с1} = P_{в1} + P_{г1},$$

они складываются из потерь на вихревые токи  $P_{в1}$  и потерь на перемагничивание (на гистерезис)  $P_{г1}$ , эта мощность рассеивается в виде тепла в магнитопроводе статора асинхронного двигателя.

- Разницу

$$P_1 - P_{э1} - P_{с1}$$

называют *электромагнитной мощностью* и обозначают  $P_{эм}$ . 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

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

обозначается  $P_{\varepsilon м}$  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  $\Delta P_{\varepsilon м}$  и будем называть *механические потери*.
- Добавочные потери  $P_{доб}$  включают в себя все виды трудно учитываемых потерь, вызванных действием высших гармоник МДС, пульсацией магнитного потока и другими причинами. В соответствии с ГОСТом принимают  $P_{доб} = 0.005 P_1$ .
- Полезная механическая мощность

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

где  $M_2$  – полезный вращающий момент на валу двигателя,  $\Omega_2$  – 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  $\alpha_2$  – 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 двигателя<sup>5</sup>

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

---

<sup>5</sup>С 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  $\Delta M$  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

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

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

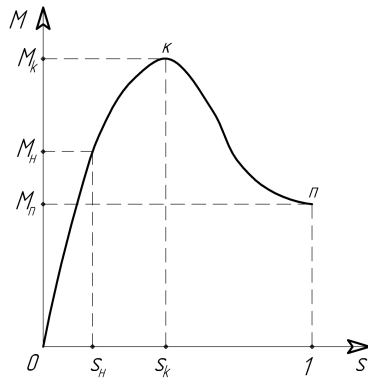


Рис. -1.26: Механическая характеристика асинхронного двигателя  $M(s)$

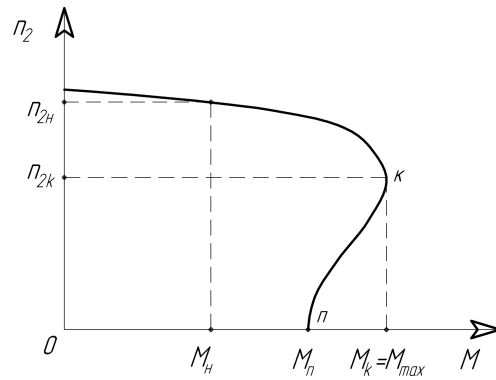


Рис. -1.27: Механическая характеристика асинхронного двигателя  $n_2(M)$ .

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 двигателя<sup>6</sup>

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

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

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

<sup>6</sup>Номинальным называется наиболее часто встречающийся режим, на который рассчитан асинхронный двигатель.

Из формулы (-1.15) следует выражение для пускового момента

$$M = \frac{pm_2 U_1^2}{\omega_1 (X_{s2}^2 + R_2^2)} \cdot R_2. \quad (-1.21)$$

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

$$K = \frac{pm_2 U_1^2}{\omega_1},$$

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

$$M_k = \frac{K}{2X_2} = \frac{pm_2 U_1^2}{2\omega_1 X_2}, \quad (-1.24)$$

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.

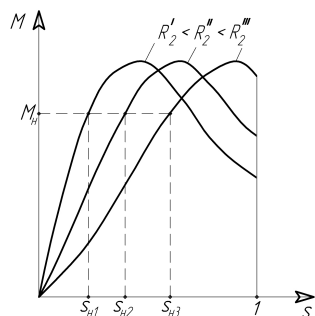


Рис. -1.28: Механические характеристики при изменении сопротивления обмотки ротора.

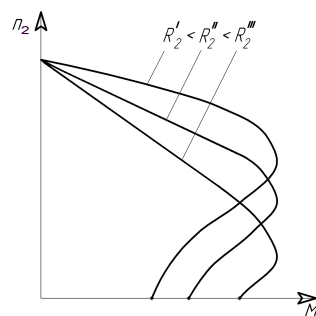


Рис. -1.29: Механические характеристики при изменении сопротивления обмотки ротора.

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 естественной<sup>7</sup> 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,

---

<sup>7</sup>Механическая 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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$M_{\Pi} = \frac{2M_{\kappa}}{\frac{s_{\kappa}}{s_{\Pi}} + \frac{s_{\Pi}}{s_{\kappa}}}.$$

Отсюда

$$M_{\kappa} = \frac{1}{2}M_{\Pi} \cdot \left(\frac{s_{\kappa}}{s_{\Pi}} + \frac{s_{\Pi}}{s_{\kappa}}\right).$$

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

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

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

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

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  $M_{\kappa}$

$$M_{\kappa} = \frac{1}{2} M_{\text{н}} \cdot \left( \frac{s_{\kappa}}{s_{\text{н}}} + \frac{s_{\text{н}}}{s_{\kappa}} \right) = \frac{1}{2} 487 \cdot \left( \frac{0,3}{0,04} + \frac{0,04}{0,3} \right) = 1852 \text{ Н м}.$$

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

$$M = \frac{2M_{\kappa}}{\frac{s_{\kappa}}{s} + \frac{s}{s_{\kappa}}} = \frac{3704}{\frac{0,3}{s} + \frac{s}{0,3}}.$$

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  $P_{2\text{н}} = 800$  Вт, включен в сеть с номинальным напряжением  $U_{1\text{н}} = 220$  В и частотой  $f_1 = 50$  Гц. Скольжение ротора в номинальном режиме  $s_{\text{н}} = 3$  %. Коэффициент полезного действия двигателя в номинальном режиме  $\eta_{\text{н}} = 0,78$ . Косинус угла нагрузки, с которым двигатель работает в номинальном режиме,  $\cos \varphi_{\text{н}} = 0,86$ . 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  $I_{\Pi}$  токи, номинальный  $M_{\text{н}}$ , пусковой  $M_{\Pi}$  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  $I_{\Pi}$  ток определяется из соотношения

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

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