

Федеральное агентство по образованию  
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ «МАМИ»

Кафедра: Электротехника и компьютеризированные  
электрохимические системы

Кецарис А.А. Полякова В.Н. Девочкин О.В.

## **Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения.**

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.

Девочкин О.В.

**Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения.**

**Учебное пособие для выполнения расчетно-графических работ по курсу "Общая электотехника". стр. 44, Рис. 38, табл. 2, библи. 3, МАМИ, 2009 г.**

В учебном пособии приведены сведения о магнитном поле и двигателе постоянного тока параллельного возбуждения, необходимые для выполнения расчетно-графической работы. Даны примеры расчета двигателя постоянного тока параллельного возбуждения.

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

©Московский государственный технический университет «МАМИ»,  
2009 г.

## 1. Задание на расчетно-графическую работу.

### 1.1. Задача №4. Варианты 1 – 25.

Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения, номинальное напряжение которого  $U_n$ , при номинальной нагрузке потребляет ток  $I_n$ , а при холостом ходе потребляет ток  $I_0$ . Номинальная частота вращения двигателя равна  $n_n$ , сопротивление обмотки якоря двигателя равно  $R_{я}$ , сопротивление цепи обмотки возбуждения двигателя равно  $R_v$ . Магнитные и механические потери принять постоянными при всех режимах работы двигателя.

Определить:

- номинальную мощность двигателя  $P_n$ ,
- номинальный вращающий момент  $M_n$ ,
- номинальный коэффициент полезного действия  $\eta_n$ ,
- пусковой ток двигателя  $I_{п}$  без пускового реостата,
- сопротивление пускового реостата при условии  $I_{п} = 2,5I_n$ ,
- пусковой момент  $M_{п}$  при пуске двигателя с реостатом.

Таблица 1.

№ вар.	$U_n$ В	$I_n$ А	$I_0$ А	$R_{я}$ Ом	$R_{в}$ Ом	$n_n$ об/мин
1	220	53	5,3	0,212	33	1225
2	115	100	9,5	0,11	50	1000
3	110	267	5	0,04	27,5	1100
4	220	16,5	1,78	1,16	75	1025
5	110	7,8	0,7	0,8	210	1240
6	220	19,8	2,0	1,5	150	960
7	110	35	3,2	0,6	60	1400
8	220	32	2,8	0,94	120	1600
9	220	34	3,0	0,45	110	1100
10	110	9,5	0,9	1,9	200	850
11	110	20	1,8	0,7	80	940
12	220	15	1,5	0,82	200	1350
13	110	8,2	0,8	1,4	220	1450
14	220	20,5	2,35	0,74	258	1025
15	220	40	4,2	0,32	190	1420
16	110	10,5	1,2	1,2	160	960
17	110	18,6	2,0	0,9	120	825
18	220	16	1,8	0,6	270	1600
19	220	32	3,5	0,62	200	1350
20	110	28	3,2	0,55	80	875
21	110	25	2,6	0,58	90	1110
22	220	60	6,8	0,4	130	93,5
23	220	50	5,7	0,4	150	1340
24	220	102	9,5	0,12	110	750
25	220	151	15	0,07	75	1000

### 1.2. Задача №4. Варианты 26 – 50.

Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения, номинальное напряжение которого равно  $U_n$ , развивает номинальную мощность  $P_n$ . Номинальная частота вращения двигателя равна  $n_n$ , номинальный коэффициент полезного действия равен  $\eta_n$ . Потери мощности в цепи якоря и в цепи возбуждения заданы в процентах от потребляемой мощности двигателя  $P_{1n}$ .

Определить:

- ток в цепи обмотки возбуждения  $I_{\text{в}}$ ,
- ток в обмотке якоря при номинальной нагрузке  $I_{\text{ян}}$ ,
- номинальный вращающий момент  $M_{\text{н}}$ ,
- сопротивление пускового реостата при условии  $I_{\text{п}} = 2,5I_{\text{н}}$ ,
- пусковой момент  $M_{\text{п}}$  при пуске двигателя с реостатом.

Таблица 2.

№ вар.	$U_{\text{н}}$ В	$P_{\text{н}}$ кВт	$\Delta P_{\text{я}}$ %	$\Delta P_{\text{в}}$ %	$n_{\text{н}}$ об/мин	$\eta_{\text{н}}$ %
26	110	60	5,2	4,8	1225	86,5
27	220	10	5,0	4,8	1000	86,0
28	220	4,0	6,2	4,2	1100	82,2
29	220	6,6	6,2	4,1	1025	85,5
30	220	4,4	6,5	4,8	1240	84,5
31	220	2,5	5,8	4,8	960	85,0
32	220	10,0	5,3	4,4	1400	83,0
33	110	77	5,0	4,2	1600	85,3
34	110	80	5,4	4,5	1100	85,8
35	110	92	5,3	4,1	850	86,5
36	110	8,6	6,2	5,0	940	85,5
37	110	35	6,3	5,2	1350	84,5
38	110	45	5,7	4,6	1450	85,0
39	220	15	5,0	4,0	1025	84,5
40	220	10	5,2	4,2	1420	85,5
41	220	5,8	6,0	5,0	960	84,0
42	220	19	4,8	4,5	825	86,5
43	220	29	5,0	4,3	1600	86,0
44	220	46,5	5,4	4,8	1350	82,2
45	220	14	4,0	4,6	875	84,0
46	220	20,5	5,1	4,2	1110	85,5
47	220	33,5	5,5	4,0	935	84,5
48	220	8,5	4,0	4,1	1340	85,5
49	220	13,5	4,8	4,2	750	85,0
50	110	60	5,0	4,0	1000	84,5

## 2. Необходимые сведения о магнитных явлениях.

К магнитным явлениям относятся такие явления, которые связаны с взаимодействием и движением токов. Установлено, что токи взаимодействуют между собой. Простейшим примером взаимодействия токов служит опыт Ампера.

### 2.1. Опыт Ампера.

Рассмотрим параллельные проводники длиной  $l$  (Рис.1.), пусть расстояние между проводниками равно  $r$  и по проводникам текут токи соответственно  $i_1$  и  $i_2$ .<sup>1</sup> Согласно эксперименту такие проводники притягиваются друг к другу, причем сила притяжения определяется формулой

$$F = \frac{\mu \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot l}{2 \cdot \pi \cdot r}, \quad (-1.1)$$

здесь  $\mu$  постоянный коэффициент, называемый *магнитная проницаемость* среды, в которой находятся проводники с током. Приведенная формула называется *законом Ампера* для параллельных проводников, а сила взаимодействия между проводниками называется *силой Ампера*. Все материалы, за исключением *ферромагнитных* обладают магнитной проницаемостью

$$\mu = \mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2}$$

которая называется *магнитной проницаемостью вакуума*. Наилучшие ферромагнитные материалы имеют магнитную проницаемость

$$\mu \approx \mu_0 \cdot 10^6.$$

Именно поэтому для увеличения силы Ампера все проводники с током в электрических машинах окружаются ферромагнитной средой. Конструктивные элементы, выполненные из ферромагнитного материала и используемые для указанной цели, называются *магнитопроводом*.

---

<sup>1</sup>Проводник с током удобно рассматривать как вектор, величина которого равна длине проводника, а направление совпадает с направлением тока. На рис.1. использована символика, которая будет применяться в дальнейшем: вектор, перпендикулярный плоскости листа и направленный к наблюдателю, обозначается кружком с точкой. На рис.2. использована символика, которая будет применяться в дальнейшем: вектор, перпендикулярный плоскости листа и направленный от наблюдателя, обозначается кружком с крестиком.

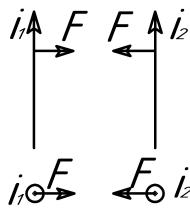


Рис. -1.1: Опыт Ампера с одинаправленными токами.

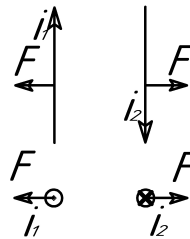


Рис. -1.2: Опыт Ампера с разнаправленными токами.

Если в предыдущем опыте один из токов (например, ток  $i_2$ ) направить в противоположную сторону (Рис.2.), то в этом случае проводники отталкиваются друг от друга, причем величина силы отталкивания по-прежнему определяется формулой (-1.1).

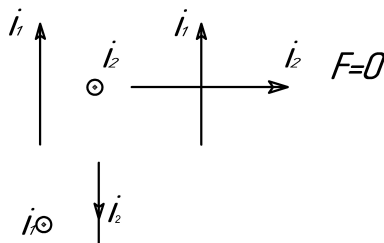


Рис. -1.3: Опыт Ампера с перпендикулярными токами.

Опыт показывает, что в случае, когда проводники с токами перпендикулярны друг другу (Рис.3.), проводники не взаимодействуют. Иначе говоря, сила взаимодействия между проводниками в этом случае равна нулю.

Для того, чтобы понять о каких по величине силах идет речь, вычислим силу отталкивания между участками троллейбусных проводов длиной  $l = 1\text{м}$ , находящихся друг от друга на расстоянии  $r = 0,5\text{м}$ , и по которым текут токи  $i_1 = i_2 = 10\text{А}$ .

$$F = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{Н/А}^2 \cdot 10\text{А} \cdot 10\text{А} \cdot 1\text{м}}{2 \cdot \pi \cdot 0,5\text{м}} = 4 \cdot 10^{-5} \text{Н}.$$

С такой силой масса  $4 \cdot 10^{-6}\text{г}$  притягивается с Земле. Иначе говоря, сила ничтожно мала по величине. Если троллейбусные провода окружить ферромагнитной средой с максимальной магнитной проницаемостью, то сила Ампера увеличится до  $40\text{Н}$ , что эквивалентно силе притяжения к Земле массы  $4\text{кг}$ , что вполне ощутимо.

## 2.2. Магнитное поле. Вектор магнитной индукции.

Опираясь на указанные опыты можно сказать, что проводники с токами взаимодействуют на расстоянии друг от друга. Этот факт является необычным, так как в большинстве случаев, с которыми имеют дело на практике, взаимодействие тел сопровождается их непосредственным контактом друг с другом. Для описания этого факта вводится понятие *магнитное поле*. Магнитное поле - это пространство или его часть, в каждой точке которого на ток, внесенный в эту точку, действует сила. Представим себе, что в первом опыте проводник с током  $i_2$  вносится в пространство, окружающее проводник с током  $i_1$ . Так как на проводник с током  $i_2$  действует сила Ампера, то, следовательно, пространство, окружающее проводник с током  $i_1$ , представляет собой магнитное поле. *Источником* этого магнитного поля является проводник с током  $i_1$ .

Количественно магнитное поле характеризуется вектором, который называется *вектор магнитной индукции* и обозначается  $\mathbf{B}$ . Этот вектор вводится в каждой точке магнитного поля и определяется тем условием, что вектор силы  $\mathbf{F}$ , действующей на проводник длиной  $l$  с током  $i$ , вносимый в точку магнитного поля с вектором магнитной индукции  $\mathbf{B}$ , равен<sup>2</sup>

$$\mathbf{F} = i \cdot [\mathbf{l}, \mathbf{B}]. \quad (-1.2)$$

Здесь  $\mathbf{l}$  это вектор, величина которого равна длине проводника, а направление совпадает с направлением тока  $i$ . Квадратные скобки означают *векторное* произведение векторов  $\mathbf{l}$  и  $\mathbf{B}$ . Таким образом, вектор силы  $\mathbf{F}$  это вектор, величина которого равна

$$F = i \cdot l \cdot B \cdot \sin \alpha, \quad (-1.3)$$

где  $\alpha$  это угол между векторами  $\mathbf{l}$  и  $\mathbf{B}$ . Направление вектора силы определяется правилом *левой руки*. Сформулируем это правило: если вектор магнитной индукции  $\mathbf{B}$  входит в ладонь левой руки, а четыре пальца направлены по вектору  $\mathbf{l}$ , то вектор силы  $\mathbf{F}$  направлен по отогнутому большому пальцу. Соотношение (-1.2) называется *законом Ампера*, сила  $\mathbf{F}$  называется *силой Ампера*.

Закон Ампера позволяет определить вектор магнитной индукции  $\mathbf{B}$ . Действительно, из (-1.3) определяется величина вектора магнитной ин-

---

<sup>2</sup>Как принято, векторы обозначаются жирными буквами, а величины векторов прописными.



дукции

$$B = \frac{F}{i \cdot l \cdot \sin \alpha}, \quad (-1.4)$$

а направление вектора магнитной индукции определяется правилом левой руки в следующей модификации: если вектор  $\mathbf{l}$  проводника с током, вносимого в магнитное поле, направить по четырем пальцам левой руки, а вектор силы, действующей на проводник со стороны магнитного поля, направить по отогнутому большому пальцу, то вектор магнитной индукции входит в ладонь. Из соотношения (-1.4) следует, что единицей измерения магнитной индукции является

$$[B] = \frac{[F]}{[i] \cdot [l]} = \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} = \text{Тл},$$

Эта единица имеет специальное название *тесла* и обозначается Тл.

Полезно рассмотреть два частных случая закона Ампера. Первый случай, когда угол между векторами  $\mathbf{l}$  и  $\mathbf{B}$  равен  $\pi/2$ . Этот случай, как правило, используется в электрических машинах. При этом сила Ампера максимальна и равна

$$F = i \cdot l \cdot B, \quad (-1.5)$$

Второй случай, когда угол между векторами  $\mathbf{l}$  и  $\mathbf{B}$  равен 0 или  $\pi$ . При этом сила Ампера равна нулю.

### 2.3. Магнитное поле линейного проводника с током.

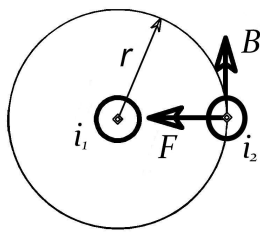


Рис. -1.4: Вектор  $\mathbf{B}$  линейного проводника с током.

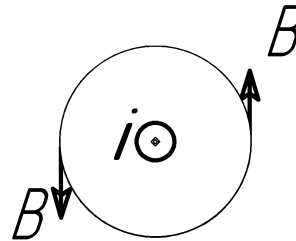


Рис. -1.5: Магнитное поле линейного проводника с током.

Рассмотрим пространство, окружающее линейный проводник длиной  $l$  с током  $i_1$ . Поместим в точку "а", находящуюся на расстоянии  $r$  от указанного проводника, параллельно ему другой проводник длиной  $l$  с током  $i_2$ , причем направим ток  $i_2$  в ту же сторону, что и ток  $i_1$ . Тогда в соответствии с опытом Ампера на внесенный проводник действует сила притяжения  $\mathbf{F}$ . В соответствии с правилом левой руки вектор магнитной индукции  $\mathbf{B}$  направлен перпендикулярно векторам  $\mathbf{F}$  и  $\mathbf{l}$  так как показано на рис.4. Величина вектора магнитной индукции в точке "а" определяется на основании соотношений (-1.4) для  $\alpha = \pi/2$  и (-1.1) и равна

$$B = \frac{F}{i_2 \cdot l} = \frac{\mu \cdot i_1}{2 \cdot \pi \cdot r}. \quad (-1.6)$$

Отсюда следует, что векторы магнитной индукции в точках окружности радиуса  $r$  одинаковы по величине. Кроме того, из правила левой руки следует, что эти векторы касаются указанной окружности (рис.5.).

Итак, мы установили вектор магнитной индукции для произвольной точки магнитного поля, окружающего линейный проводник с током. Проверим не противоречит ли такое представление о магнитном поле

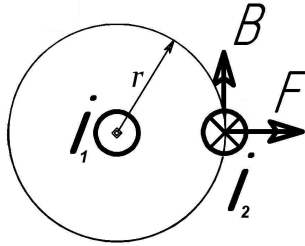


Рис. -1.6: Магнитное поле линейного проводника с током.

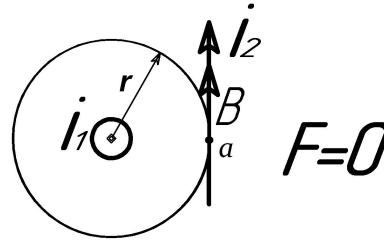


Рис. -1.7: Магнитное поле линейного проводника с током.

другим опытам Ампера. Для этого сначала поместим в точку "а", находящуюся на расстоянии  $r$  от указанного проводника, параллельно ему другой проводник длиной  $l$  с током  $i_2$ , причем направим ток  $i_2$  в сторону, противоположную току  $i_1$  (рис.6). Тогда в соответствии с законом Ампера (-1.5) и (-1.6) сила Ампера сохранит свою величину

$$F = i_2 \cdot l \cdot B = i_2 \cdot l \cdot \frac{\mu \cdot i_1}{2 \cdot \pi \cdot r},$$

но в соответствии с правилом левой руки изменит свое направление, что соответствует отталкиванию проводников друг от друга. Таким образом, установленное описание магнитного поля полностью соответствует результатам этого опыта Ампера.

Теперь обратимся к третьему опыту Ампера. Поместим в точку "а", находящуюся на расстоянии  $r$  от указанного проводника, перпендикулярно ему другой проводник длиной  $l$  с током  $i_2$  (рис.7.). И вычислим силу, действующую на вносимый проводник со стороны магнитного поля. В этом случае угол между векторами  $\mathbf{l}$  и  $\mathbf{B}$  равен 0. При этом сила Ампера равна нулю, что также соответствует эксперименту. Таким образом, описание магнитного поля с помощью вектора магнитной индукции и закона Ампера позволяет получить результаты, соответствующие эксперименту.

## 2.4. Силовые линии.

Магнитное поле геометрически удобно изображать с помощью *силовых линий*. Приведем свойства силовых линий.

- Вектор магнитной индукции касается силовой линии в каждой ее точке.
- Силовые линии замкнуты.
- Силовые линии не пересекаются.
- Силовые линии охватывают проводники с токами. Другими словами, проводники с токами пересекают площадь, ограниченную силовыми линиями.
- Силовые линии имеют направлением, совпадающее с направлением касательного вектора магнитной индукции.
- Направление силовых линий и направление тока, который эти линии охватывают, подчиняются *правилу правого винта*. Это правило формулируется следующим образом: если правый винт вращать по направлению силовой линии, то движение оси винта укажет направление тока, который эти линии охватывают.

### 2.5. Силовые линии линейного проводника с током.

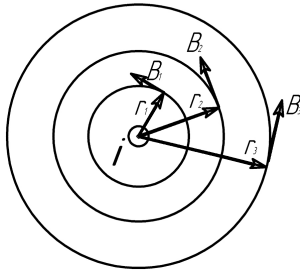


Рис. -1.8: Силовые линии линейного проводника с током.

В разделе 2.3 было показано, что вектор магнитной индукции касается окружности радиуса  $r$  с центром на проводнике с током. Отсюда следует, что силовыми линиями линейного проводника с током являются concentric окружности (рис.8). Эти линии замкнуты и не пересекаются. Через площадь круга, который ограничен силовой линией, проходит проводник с током. Направление этого тока и направление силовой линии подчиняются правилу правого винта. В целом силовые линии лежат на цилиндрических поверхностях.

### 2.6. Силовые линии витка с током.

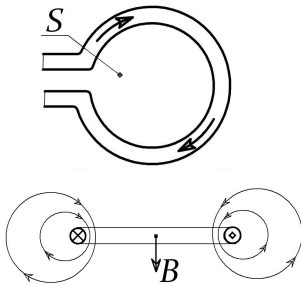


Рис. -1.9: Силовые линии витка с током.

Виток это проводник, уложенный по периметру некоторой площади. Величина этой площади  $S$  является параметром витка. Силовые линии вблизи витка ничем не отличаются от силовых линий линейного проводника с током, то есть это окружности с центром на витке. По мере удаления от витка силовые линии представляют окружности, центр которых удаляется от витка (рис.9). В целом силовые линии лежат на тороидальных поверхностях.

### 2.7. Силовые линии катушки с током.

Катушка образована последовательным соединением витков, центры площадей которых находятся на одной линии – оси катушки. Параметрами катушки являются величина площади витка  $S$  и число витков катушки  $w$ .

Силовые линии магнитного поля катушки с током построим, исходя из силовых линий магнитного поля витка и принципа суперпозиции,

который состоит в том, что магнитное поле нескольких проводников с током можно рассматривать как векторную сумму магнитных полей каждого из проводников в отдельности.

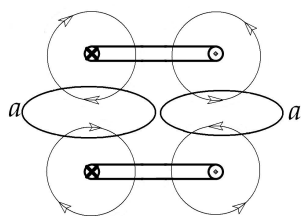


Рис. -1.10: Магнитные поля двух витков с током.

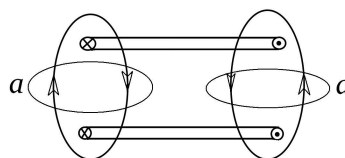


Рис. -1.11: Результирующее магнитное поле двух витков с током.

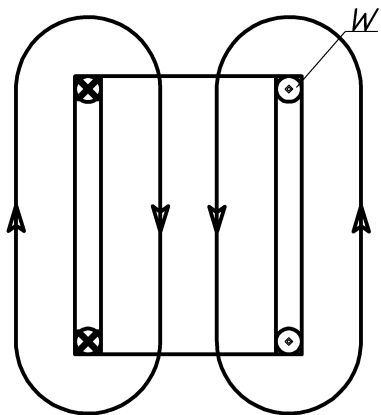


Рис. -1.12: Силовые линии катушки с током.

На рис.10. показаны силовые линии двух рядом лежащих витков в катушке с током. В областях "а" магнитные поля витков одинаковы по величине и противоположны по направлению. Поэтому в указанных областях магнитное поле отсутствует (рис.11). Отсюда следует, что силовые линии магнитного поля катушки с током имеют вид, показанный на рис.12.

## 2.8. Силовая трубка.

Помимо силовых линий магнитное поле геометрически изображается с помощью *силовой трубки*. Силовая трубка это объемная фигура, боковая поверхность которой образована силовыми линиями, а торцевые поверхности перпендикулярны силовым линиям. На рис.13 показаны силовые линии линейного проводника с током. Жирными линиями выделена часть магнитного поля и нарисована отдельно. Поверхности  $aehc$ ,  $abfg$ ,  $bfgd$ ,  $cdgh$  являются боковыми поверхностями силовой трубки. Они образованы силовыми линиями. Поверхности  $abdc$ ,  $efgh$  являются торцевыми.

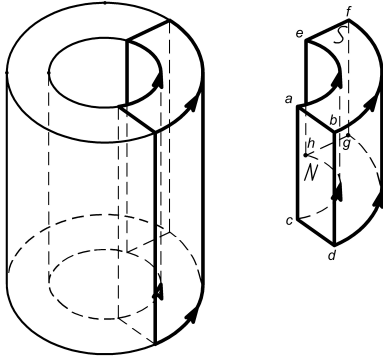


Рис. -1.13: Силовая трубка.

Они перпендикулярны силовым линиям. Торцевая поверхность, из которой силовые линии входят в силовую трубку, называется *северный полюс* и обозначается буквой *N*. В нашем примере это торцевая поверхность *abdc*. Торцевая поверхность, в которую силовые линии входят из силовой трубки, называется *южный полюс* и обозначается буквой *S*. В нашем примере это торцевая поверхность *efgh*.

## 2.9. Магнитный поток. Явление электромагнитной индукции.

Для описания явления электромагнитной индукции магнитное поле удобно характеризовать величиной, называемой *магнитным потоком*.

Магнитный поток обозначается буквой  $\Phi$ . В наиболее простом и наиболее важном для практики случае магнитный поток определяется следующим образом. Пусть в магнитном поле задана площадь  $S$  и каждой точке площади соответствует вектор магнитной индукции  $\mathbf{B}$ , причем этот вектор перпендикулярен площади. Тогда магнитный поток определяется как произведение

$$\Phi = B \cdot S.$$

Если ввести вектор площади  $\mathbf{S}$ , то в общем случае магнитный поток определяется как скалярное произведение векторов  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{S}$

$$\Phi = (\mathbf{B}, \mathbf{S}).$$

Явление электромагнитной индукции состоит в том, что при движении проводника в неподвижном магнитном поле в проводнике возникает (индуцируется, наводится) электродвижущая сила (ЭДС) (рис.14). В соответствии с законом Фарадея индуцируемая в проводнике ЭДС равна

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

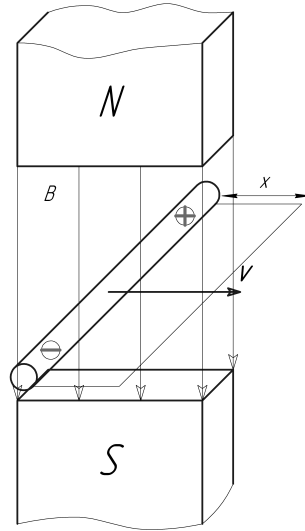


Рис. -1.14: К явлению электромагнитной индукции.

где  $\Phi$  – магнитный поток, проходящий через площадь, которую пересекает проводник, движущийся в неподвижном магнитном поле. Пусть  $B$  – величина вектора магнитной индукции неподвижного магнитного поля,  $l$  – длина проводника, а  $x$  – перемещение проводника, тогда магнитный поток

$$\Phi = B \cdot l \cdot x.$$

Подставляя это соотношение в (-1.7), получим

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -Bl\frac{dx}{dt} = -Blv, \quad (-1.8)$$

где  $v$  – скорость движения проводника.

### 3. Необходимые сведения о двигателе постоянного тока.

Работа двигателя постоянного тока основана на явлении Ампера. В соответствии с этим явлением на проводник с током, находящийся в магнитном поле, действует сила (рис.15). Если  $B$  – величина вектора магнитной индукции неподвижного магнитного поля,  $l$  – длина проводника, а  $i$  – величина тока в проводника, то сила, действующая на проводник, определяется выражением (-1.5).

Поставим задачу: используя вышеуказанное явление Ампера, сконструировать двигатель постоянного тока.

#### 3.1. Простейший двигатель постоянного тока.

Рассмотрим сначала устройство, показанное на рис.16. В неподвижном постоянном магнитном поле находится виток (1) с возможностью вращения вокруг оси "00". Виток имеет длину  $l$  и ширину  $D$ . Виток подсоединен к неподвижному источнику постоянного тока через *щеточно-кольцевой узел*. щеточно-кольцевой узел устроен следующим образом. На роторе соосно витку установлены два кольца (2), выполненные из электропроводящего материала. Конец витка "а" электрически соединен с одним кольцом, а

конец витка "b" электрически соединен с другим кольцом. К внешней поверхности колец примыкают неподвижные контакты (3), называемые *щетками*. Между неподвижными щетками и вращающимися кольцами имеет место скользящий электрический контакт. Неподвижные щетки

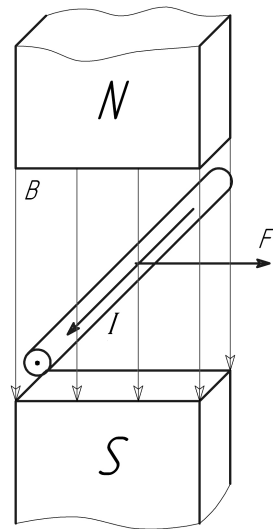


Рис. -1.15: Явление Ампера.

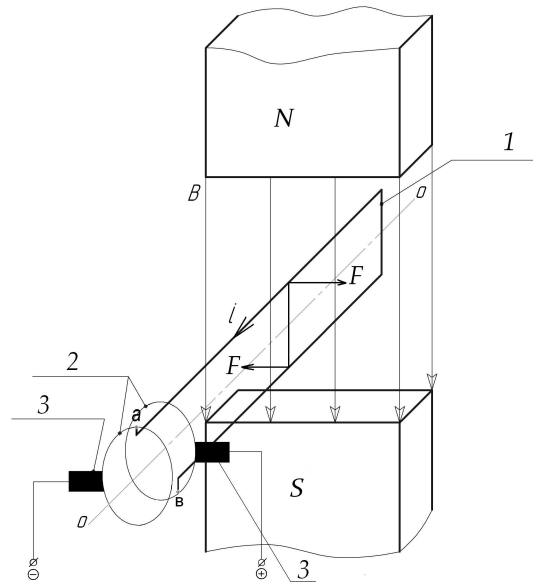


Рис. -1.16: Пояснение к простейшему двигателю постоянного тока.

соединены с клеммами неподвижного источника постоянного тока. В результате указанных соединений под действием напряжения источника по витку течет ток  $i$ . На сторону витка, находящуюся под полюсом  $N$ , в соответствии с законом Ампера (-1.2), действует сила, направленная как показано на рисунке. На противоположную сторону витка, находящуюся под полюсом  $S$ , действует сила Ампера, направленная в противоположную сторону. Таким образом, на виток действует момент относительно оси "0-0", величина которого равна

$$M = \frac{D}{2} i l B.$$

Под действием этого момента виток начнет вращаться вокруг оси "0-0" по часовой стрелке. При повороте витка на половину оборота стороны витка окажутся под полюсами противоположной полярности: сторона витка с концом "a" – под полюсом "S", а сторона витка с концом "b" – под полюсом "N". Поэтому силы, действующие на стороны витка, поменяют свое направление на противоположное. То есть, после поворота вит-



ка на половину оборота момент, действующий на виток, будет направлен против часовой стрелки. В результате мы получили, что рассматриваемое устройство создает *знакопеременный* момент. Зависимость момента от угла поворота витка в этом устройстве показана на рис.17.

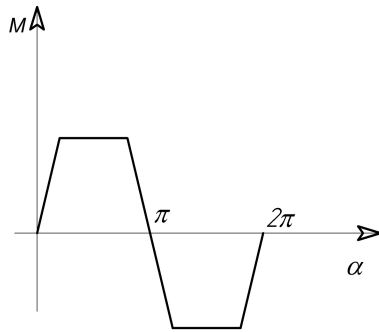


Рис. -1.17: Зависимость момента от угла поворота витка.

Таким образом, сконструированное устройство не может служить двигателем, так как не обеспечивает непрерывное вращение ротора в одну сторону.

Несмотря на то, что поставленную задачу мы не выполнили, выясняется путь, по которому нужно идти для ее решения. Необходимо вместо щеточно-кольцевого узла сконструировать такой скользящий контакт, который через каждую половину оборота подсоединял концы витка к другим щеткам. Так если сначала конец витка "а" был соединен с левой щеткой, а конец витка "b" был соединен с правой щеткой, то через половину оборота конец витка "а" должен быть соединен с правой щеткой, а конец витка "b" должен быть соединен с левой щеткой.

Иначе говоря, к одной и той же щетке всегда должна быть подсоединена сторона витка, находящаяся по одним и тем же полюсам. На рис.18 показан такой скользящий контакт. Он содержит полукольца (1) и (2), к которым к которым подсоединены концы витка. В указанный момент сторона витка "а" находится под полюсом "N" и подсоединена к щетке (3) через полукольцо (1), сторона витка "b" находится под полюсом "S" и подсоединена к щетке (4) через полукольцо (2). Через половину оборота под полюсом "N" окажется сторона витка "b" и через полукольцо (2) соединится с щеткой (3), а под полюсом "S" окажется сторона витка "а" и через полукольцо (1) соединится с щеткой (4). В результате при вращении витка на роторе получим постоянный по направлению вращающий момент. Зависимость момента от угла поворота витка показана на рис.19.

В результате мы выполнили поставленную задачу и сконструировали двигатель постоянного тока. Необходимым элементом такого двигателя является контактный узел, назначение которого состоит в том, чтобы подсоединять в одном и тем же щеткам в каждый момент поворота ротора те стороны витка, которые находятся по одним и тем же полюсам.

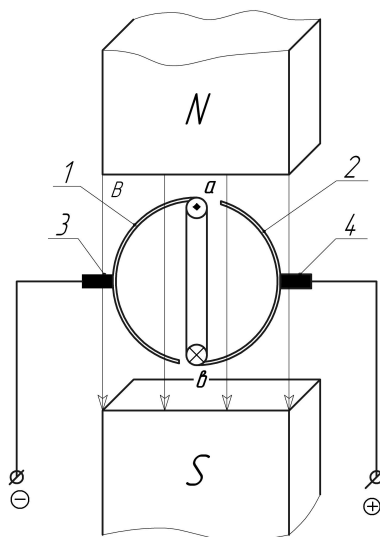


Рис. -1.18: Простейший двигатель постоянного тока.

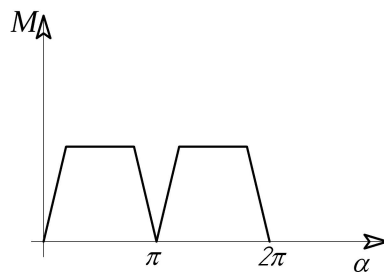


Рис. -1.19: Зависимость момента от угла поворота.

Такой контактный узел называется *щеточно-коллекторным* узлом.

Следующая задача состоит в том, чтобы

- сконструировать магнитную систему, создающую неподвижное в пространстве и постоянное во времени магнитное поле;
- для увеличения мощности двигателя использовать не один виток, а много витков, расположив их по внешней поверхности ротора;
- сконструировать щеточно-коллекторный узел, предназначенный не для одного витка, а для многих витков.

Далее рассмотрим такую конструкцию двигателя постоянного тока.

### 3.2. Устройство двигателя постоянного тока.

Предварительно дадим следующие определения. Часть электрической машины, в которой создается магнитный поток, называется *индуктор*. Часть электрической машины, в которой этот поток наводит ЭДС, на-

зывается *якорь*<sup>3</sup>. Существует другое разделение электрической машины на части: неподвижная часть электрической машины называется *статор*, вращающаяся часть электрической машины называется *ротор*. В двигателе постоянного тока индуктор расположен на статоре, а якорь расположен на роторе.

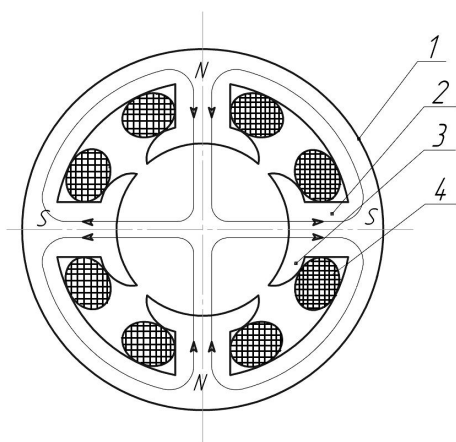


Рис. -1.20: Индуктор двигателя постоянного тока.

### 1. Устройство индуктора (статора) двигателя постоянного тока (рис.20).

Индуктор (статор) содержит магнитопровод, включающий в себя внешнюю кольцевую часть (1), которая называется *ярмо*, полюса (2), примыкающие к внутренней цилиндрической поверхности ярма, и полюсные наконечники (3), примыкающие к внутренней поверхности полюсов. Число полюсов обозначается  $2p$  ( $p$  - число пар полюсов). На полюсах установлены катушки обмотки возбуждения (4), соединенные между собой последовательно встречно. Обмотка возбуждения индуктора соединена с источником постоянного тока.

### 2. Устройство якоря (ротора) двигателя постоянного тока (рис.21).

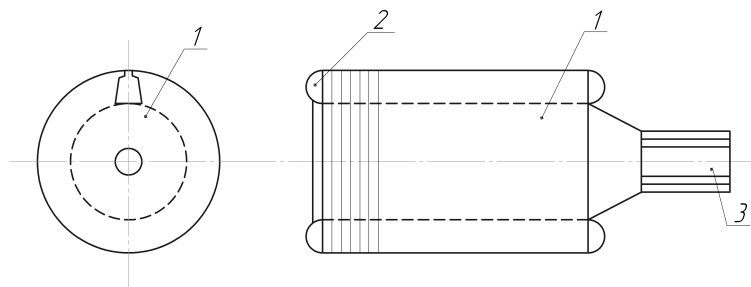


Рис. -1.21: Якорь двигателя постоянного тока.

Якорь (ротор) отделен от полюсных наконечников индуктора воздушным зазором. В теории электрических машин принято обозначать

<sup>3</sup>Процесс наведения ЭДС в двигателе постоянного тока будет рассмотрен в разделе 3.4

длину воздушного зазора между статором и ротором  $\delta$ . Отсюда

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

Здесь  $D_1$  – внутренний диаметр полюсных наконечников,  $D_2$  – внешний диаметр магнитопровода якоря. С точки зрения преобразования энергии зазор  $\delta$  должен быть минимальным, поэтому он определяется системой допусков и посадок, наложенных на магнитопроводы индуктора и якоря.

Якорь (ротор) (рис.21) содержит цилиндрический магнитопровод с пазами (1) на внешней поверхности. Внутренняя кольцевая часть цилиндрического магнитопровода якоря также называется *ярмо*. Число пазов обозначим  $Z$ . В пазы уложена обмотка (2), вращающаяся вместе с якорем. Она соединена с неподвижным источником постоянного тока через *щеточно-коллекторный узел* (3).

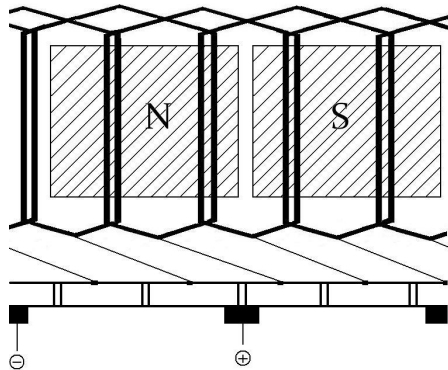


Рис. -1.22: Обмотка якоря двигателя постоянного тока.

### 3. Обмотка якоря (рис.22).

Обмотка якоря состоит из катушек, число которых равно числу пазов<sup>4</sup>  $Z$ . Расстояние между соседними катушками равно расстоянию между зубцами, которое называется *зубцовым делением*. Число пазов, находящихся под одним полюсом, равно

$$q = \frac{Z}{2p}$$

и может быть как целым, так и дробным. Отсюда ширина катушки равна целой части числа  $q$ , а число сторон катушек, находящихся под одним полюсом, равно удвоенной целой части числа  $q$  (так как катушки уложены в два слоя).

Катушки по порядку соединены последовательно согласно, то есть начало последующей катушки соединено с концом предыдущей, а конец последней катушки соединен с началом первой катушки. В результате все катушки соединены в замкнутый контур. Из мест соединений катушек выполнены выводы.

<sup>4</sup>катушки уложены в пазы в два слоя

#### 4. Устройство щеточно-коллекторного узла (рис.22, рис.23).

Щеточно-коллекторный узел (3) (рис.22) установлен на валу соосно якорю.

Щеточно-коллекторный узел (рис.23) содержит цилиндр (1), выполненный из диэлектрика и установленный на валу соосно якорю. На внешней поверхности цилиндра установлены пластины (2), выполненные из электропроводного материала. Пластины изолированы друг от друга. Число пластин равно числу катушек в обмотке якоря. Указанный цилиндр с пластинами называется *коллектор*. Каждая из пластин электрически соединена с выводом из мест соединений катушек между собой (рис.22).

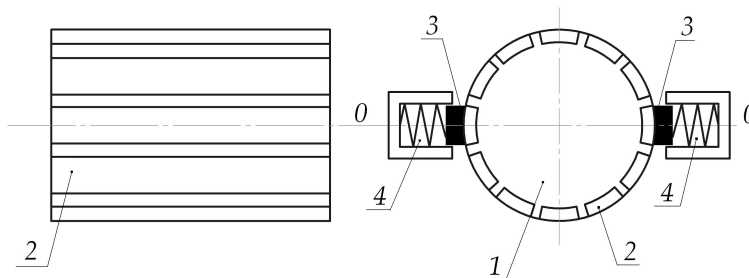


Рис. -1.23: Щеточно-коллекторный узел двигателя постоянного тока.

Внешние цилиндрические поверхности пластин контактируют с неподвижными щетками (3). Число щеток равно числу полюсов индуктора. Каждая щетка установлена на линии между полюсами, которая называется *геометрической нейтралью* (линия 0-0 на рис.23).

Неподвижные щетки и вращающиеся пластины коллектора находятся в скользящем контакте и поэтому подвержены износу, причем прежде всего изнашивается тот элемент, который выполнен из более мягкого материала. Поэтому для упрощения и удешевления ремонтных работ пластины коллектора выполняются из более жесткого материала, чем щетки. Пластины выполняются из сплава типа бронзы, щетки выполняются из графита. Щетки прижимаются к пластинам коллектора пружинами (4).

#### 5. Схемы включения обмотки возбуждения.

Свойства двигателя постоянного тока зависят от схемы включения обмотки возбуждения. Различают следующие типы двигателей.

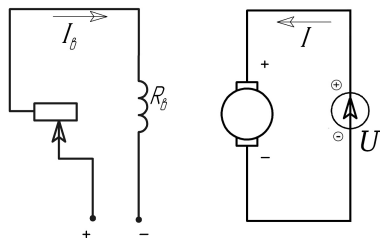


Рис. -1.24: Электрическая схема двигателя постоянного тока независимого возбуждения.

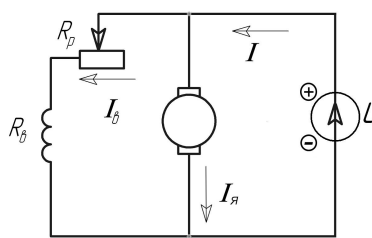


Рис. -1.25: Электрическая схема двигателя постоянного тока параллельного возбуждения.

- Двигатели постоянного тока независимого возбуждения, в которых обмотка якоря и обмотка возбуждения электрически не связаны, обмотка якоря подключена к основному источнику постоянного тока, а обмотка возбуждения подключена к дополнительному (независимому) источнику постоянного тока (рис.24).<sup>5</sup>
- Двигатели постоянного тока параллельного возбуждения, в которых обмотка якоря, обмотка возбуждения и источник постоянного тока соединены параллельно (рис.25).
- Двигатели постоянного тока последовательного возбуждения, в которых обмотка якоря, обмотка возбуждения и источник постоянного тока соединены последовательно (рис.26).
- Двигатели постоянного тока смешанного возбуждения, которые содержат две обмотки возбуждения. Одна из них соединена с обмоткой якоря и источником постоянного тока параллельно, а другая обмотка возбуждения соединена с обмоткой якоря и источником постоянного тока последовательно (рис.27).

Отметим, что свойства двигателей постоянного тока независимого возбуждения и параллельного возбуждения при источнике постоянного тока достаточной мощности одинаковы.

<sup>5</sup>На приведенных рисунках использовано принятое обозначение якоря двигателя постоянного тока – в виде окружности с выступами, символизирующими щетки. Часто таким образом обозначается двигатель постоянного тока в целом.

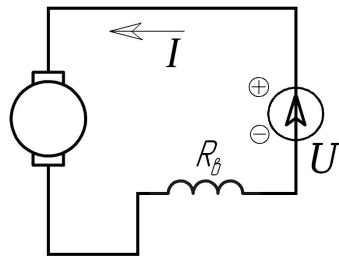


Рис. -1.26: Электрическая схема двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.

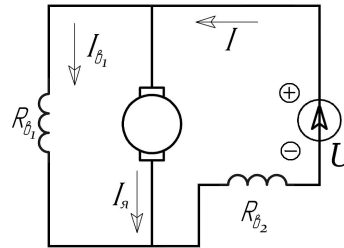


Рис. -1.27: Электрическая схема двигателя постоянного тока смешанного возбуждения.

В настоящем пособии рассматривается расчет двигателя постоянного тока параллельного возбуждения. Поэтому далее рассматривается электрическая схема двигателя постоянного тока, представленная на рис.25. На основании первого закона Кирхгофа для узла "а"имеем

$$I = I_{\text{в}} + I_{\text{я}} , \quad (-1.9)$$

где  $I$  - ток, потребляемый двигателем от источника,  $I_{\text{в}}$  - ток в обмотке возбуждения,  $I_{\text{я}}$  - ток в обмотке якоря.

### 3.3. Принцип действия двигателя постоянного тока.

Используя явление Ампера, объясним принцип действия двигателя постоянного тока. Пусть сначала ротор (якорь) неподвижен  $n = 0$ . После подключения обмотки возбуждения индуктора к источнику постоянного тока возникает неподвижное магнитное  $2p$ -полюсное поле. Силовые линии поля возбуждения представлены на рис.20 и рис.28. Магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения, будем обозначать  $\Phi$ . При подключении источника постоянного тока к обмотке якоря по обмотке протекает постоянный ток (рис.28). Для определенности положим, что якорь вращается по часовой стрелке. В соответствии с законом Ампера (и правилом левой руки) якорь вращается в указанном направлении в том

случае, если токи в проводниках, находящихся под полюсом "N", направлены к наблюдателю, а токи в проводниках, находящихся под полюсом "S", направлены от наблюдателя рис.28. Для сохранения направления вращения независимо от положения ротора эта конфигурация токов не должна зависеть от положения вращающегося ротора, то есть, должна быть неподвижной относительно индуктора. Именно этой цели служит щеточно-коллекторный узел.

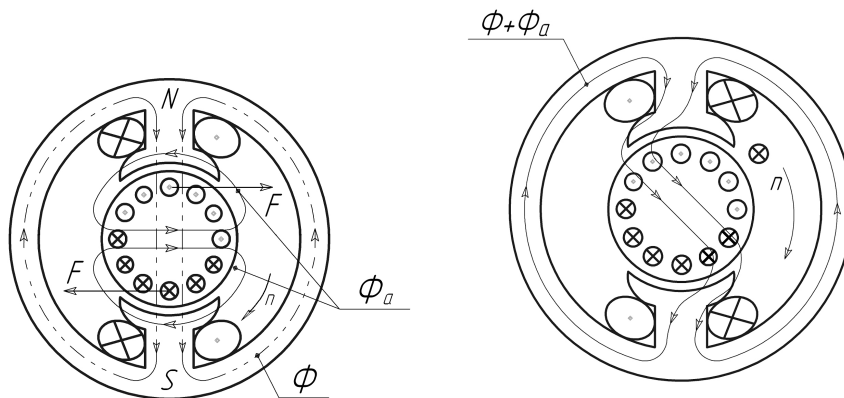


Рис. -1.28: Магнитное поле двигателя постоянного тока.

Рис. -1.29: Результирующее магнитное поле двигателя постоянного тока.

Ток в обмотке якоря создает свое магнитное поле, которое называется *реакцией якоря*. Магнитный поток поля реакции якоря будем обозначать  $\Phi_a$ . Силовые линии поля реакции якоря представлены на рис.28. Отсюда следует, что поле реакции якоря направлено по геометрической нейтрали, то есть перпендикулярно оси полюсов индуктора. Иначе говоря, реакция якоря в двигателях постоянного тока, когда щетки расположены на геометрической нейтрали, является *поперечной*.

На рис.29 показано результирующее магнитное поле, характеризующееся магнитным потоком  $\Phi + \Phi_a$ . Для силовых линий результирующего магнитного поля характерен их разворот *против* направления вращения якоря. Образно ситуацию можно представить себе следующим образом: нагрузка на валу двигателя постоянного тока растягивает силовые линии *против* направления вращения якоря.



### 3.4. ЭДС обмотки якоря.

Вычислим ЭДС, наводимую в обмотке якоря при вращении якоря в неподвижном магнитном поле индуктора. ЭДС, наводимая в проводнике (одной стороне витка), определяется формулой (-1.8) и равна по величине

$$e = Blv, \quad (-1.10)$$

где  $B$  - среднее значение магнитной индукции под полюсным наконечником,  $l$  - длина проводника,  $v$  - окружная скорость вращающегося якоря.

Окружную скорость вращения якоря  $v$ , имеющую размерность [м/сек], выразим через частоту вращения  $n$ , имеющую размерность [об/мин]

$$v = \frac{\pi D n}{60},$$

где  $D$  - диаметр якоря. Подставляя это выражение в (-1.7), получим

$$e = Bl \frac{\pi D n}{60}.$$

Разделим и умножим это выражение на число пар полюсов  $2p$ . Получим

$$e = 2p Bl \frac{\pi D n}{2p 60}.$$

Учтем, что в этом выражении величина

$$\frac{\pi D}{2p} = \tau$$

есть полюсное деление, а произведение

$$Bl\tau = \Phi$$

не что иное как магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения. В результате ЭДС, наводимая в проводнике (одной стороне витка), равна

$$e = \frac{2p}{60} n \Phi.$$

Обозначим число витков в обмотке якоря  $N$ , тогда ЭДС, индуцируемая в обмотке якоря, равна

$$E = 2Ne = \frac{4pN}{60} n \Phi.$$

В том случае, если обмотка якоря имеет  $a$  параллельных ветвей, ЭДС, индуцируемая в обмотке якоря, равна<sup>6</sup>

$$E = \frac{4pN}{60a} n\Phi. \quad (-1.11)$$

В ряде случаев удобно ввести обозначение

$$c_E = \frac{4pN}{60a},$$

используя которое, ЭДС обмотки якоря можно записать

$$E = c_E n\Phi. \quad (-1.12)$$

### 3.5. Уравнение баланса напряжений двигателя постоянного тока.

Рассмотрим контур обмотки якоря двигателя постоянного тока (рис.25). Уравнение баланса напряжений для этого контура в соответствии со вторым законом Кирхгофа записывается следующим образом:

$$R_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}} = U - E, \quad (-1.13)$$

или

$$U = E + R_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}}. \quad (-1.14)$$

Если в ветвь обмотки якоря включено дополнительное сопротивление, то уравнение баланса напряжений для контура обмотки якоря принимает вид

$$U = E + (R_{\text{я}} + R_{\text{д}}) \cdot I_{\text{я}}. \quad (-1.15)$$

### 3.6. Баланс мощности в двигателе постоянного тока.

---

<sup>6</sup>Иногда в литературе используются другие величины: число проводников  $N'$  и число пар параллельных ветвей  $a'$ . Если учесть, что  $N = N'/2$  и  $a = 2a'$ , то для ЭДС, индуцируемой в обмотке якоря, получим формулу

$$E = \frac{pN'}{60a'} n\Phi.$$

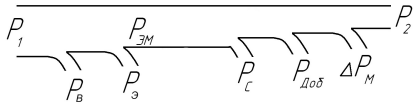


Рис. -1.30: Диаграмма мощности двигателя постоянного тока.

Для двигателя постоянного тока имеет место баланс мощности: мощность, потребляемая двигателем постоянного тока из источника, равна потерям мощности в конструктивных элементах двигателя постоянного тока и в нагрузке, приводимой им в движение.

Баланс мощности иллюстрируется *диаграммой мощности*, которая символически изображается как трубопровод с ответвлениями. См. рис.30. Здесь показаны следующие компоненты мощности.

- Мощность, потребляемая двигателем постоянного тока из сети,

$$P_1 = U \cdot I. \quad (-1.16)$$

- Потери в активном сопротивлении обмотки возбуждения двигателя постоянного тока

$$\Delta P_{\text{в}} = R_{\text{в}} \cdot I_{\text{в}}^2 = U \cdot I_{\text{в}}. \quad (-1.17)$$

Эта мощность рассеивается в виде тепла в обмотке возбуждения. Для двигателя с независимым возбуждением эта мощность потребляется из независимого источника.

- Потери в активном сопротивлении обмотки якоря

$$\Delta P_{\text{я}} = R_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}}^2. \quad (-1.18)$$

Эта мощность рассеивается в виде тепла в указанной обмотке.

- Разность

$$P_1 - \Delta P_{\text{в}} - \Delta P_{\text{я}} = U \cdot I_{\text{я}} - R_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}}^2 = E \cdot I_{\text{я}} \quad (-1.19)$$

обозначается  $P_{\text{эм}}$  и называется *электромагнитной* мощностью. Она расходуется на потери в стали якоря, добавочные потери, механические потери и полезную механическую мощность.

- Потери в магнитопроводе (в стали) якоря (ротора) двигателя постоянного тока

$$\Delta P_c = \Delta P_t + \Delta P_r.$$

Они складываются из потерь на вихревые токи  $\Delta P_t$  и потерь на перемагничивание (на гистерезис)  $\Delta P_r$ . Эта мощность рассеивается в виде тепла в магнитопроводе якоря двигателя постоянного тока.

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

$$P_2 = M_2 \Omega, \quad (-1.20)$$

где  $M_2$  – полезный вращающий момент на валу двигателя,  $\Omega$  – угловая скорость вращения якоря в рад/сек.

В результате баланс мощности для двигателя постоянного тока имеет вид<sup>7</sup>

$$P_1 = \Delta P_v + \Delta P_{\vartheta} + \Delta P_c + \Delta P_{доб} + \Delta P_m + P_2. \quad (-1.21)$$

Отсюда следует, что электромагнитная мощность равна

$$P_{эм} = P_1 - \Delta P_v - \Delta P_{\vartheta} = \Delta P_c + \Delta P_{доб} + \Delta P_m + P_2. \quad (-1.22)$$

Отношение

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% \quad (-1.23)$$

есть коэффициент полезного действия двигателя постоянного тока.

---

<sup>7</sup>для двигателя независимого возбуждения мощность  $P_v$  не входит в указанный баланс мощности

### 3.7. Электромагнитный и вращающий моменты двигателя постоянного тока.

Электромагнитный момент двигателя можно рассчитать путем суммирования моментов от сил (сил Ампера), действующих на проводники с током обмотки якоря в магнитном поле индуктора. Однако в теории электрических машин чаще используется расчет электромагнитного момента, исходя из мощности, передаваемой на ротор.

Таким образом, для электромагнитного момента, развиваемого двигателем постоянного тока, имеем

$$M = \frac{P_{\text{эм}}}{\Omega} . \quad (-1.24)$$

Здесь  $P_{\text{эм}}$  – электромагнитная мощность – мощность, передаваемая на якорь двигателя,  $\Omega$  – угловая скорость вращения якоря двигателя постоянного тока в рад/сек.

В электрических машинах угловую скорость принято измерять в оборотах в минуту. Такая скорость обозначается  $n$  и называется частотой вращения. Скорость  $\Omega$  и частота вращения  $n$  связаны между собой соотношением

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{n}{9,55} ,$$

Подставляя это выражение в (-1.24), получим

$$M = \frac{60 P_{\text{эм}}}{2\pi n} = 9,55 \cdot \frac{P_{\text{эм}}}{n} . \quad (-1.25)$$

Используя это выражение и соотношение (-1.19), для электромагнитного момента получим

$$M = \frac{60 E I_{\text{я}}}{2\pi n} = 9,55 \cdot \frac{E I_{\text{я}}}{n} .$$

Далее, используя выражение (-1.12) для ЭДС, наводимой в обмотке якоря, получим

$$M = \frac{60 c_E}{2\pi} \Phi I_{\text{я}} .$$

В ряде случаев удобно ввести обозначение

$$c_M = \frac{60 c_E}{2\pi} = \frac{2pN}{a\pi} ,$$

с использованием которого электромагнитный момент можно записать

$$M = c_M \Phi I_{\text{я}} . \quad (-1.26)$$

Из (-1.20) следует выражение для полезного вращающего момента

$$M_2 = \frac{60 P_2}{2\pi n} = 9,55 \cdot \frac{P_2}{n} . \quad (-1.27)$$

Из выражения для электромагнитной мощности (-1.22) следует

$$\frac{P_{\text{эм}}}{n} = \frac{P_2}{n} + \frac{P_c + P_{\text{доб}} + \Delta P_{\text{м}}}{n} . \quad (-1.28)$$

Отсюда получаем

$$M = M_2 + \Delta M , \quad (-1.29)$$

где  $\Delta M$  момент, расходуемый на потери в стали, дополнительные потери и механические потери.

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

$$M_{\text{п}} = M_{2\text{п}} . \quad (-1.30)$$

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

### 3.8. Скоростная и механическая характеристики двигателя постоянного тока.

#### Скоростная характеристика.

Это зависимость частоты вращения якоря от тока в обмотке якоря  $n(I_{\text{я}})$  при постоянном напряжении питания  $U = \text{const}$  и постоянном токе возбуждения  $I_{\text{в}} = \text{const}$ <sup>8</sup>. Уравнение скоростной характеристики следует из уравнения баланса напряжений для контура обмотки якоря (-1.10)

$$E = U - R_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}} .$$

Используя выражение для ЭДС, наводимой в обмотке якоря (-1.12)

$$E = c_E \Phi n ,$$

получим уравнение скоростной характеристики

$$n = \frac{U - R_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}}}{c_E \Phi} . \quad (-1.31)$$

---

<sup>8</sup>Последнее условие имеет место только для двигателей постоянного тока независимого и параллельного возбуждений.

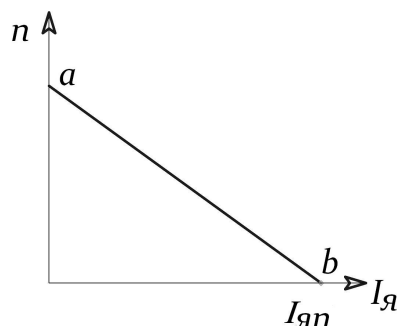


Рис. -1.31: Скоростная характеристика двигателя постоянного тока.

На рис.31 показан качественный вид скоростной характеристики. Точка "а" описывает режим идеального холостого хода, когда нагрузка на валу двигателя полностью отсутствует. Для этого режима

$$I_{\text{я}} = 0, \quad n = \frac{U}{c_E \Phi}. \quad (-1.32)$$

Точка "в" описывает режим пуска. Для него

$$n = 0, \quad I_{\text{я}} = I_{\text{яп}} = \frac{U}{R_{\text{я}}}. \quad (-1.33)$$

На рис.32 показана зависимость скоростных характеристик от напряжения питания двигателя.

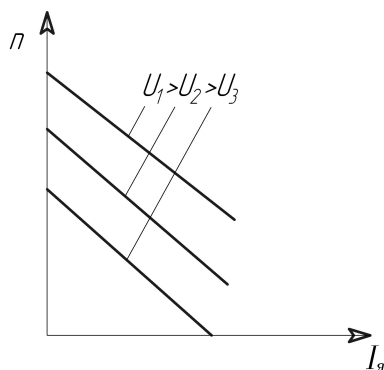


Рис. -1.32: Зависимость скоростных характеристик от напряжения питания двигателя.

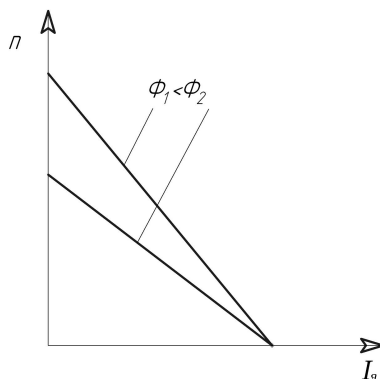


Рис. -1.33: Зависимость скоростных характеристик от магнитного потока.

На рис.33 показана зависимость скоростных характеристик от магнитного потока или тока в обмотке возбуждения. Отсюда следует, что частота вращения якоря возрастает с уменьшением магнитного потока или тока в обмотке возбуждения. По этой причине в двигателях постоянного тока, работающих на незначительную нагрузку, недопустим разрыв

цепи возбуждения. это приводит к резкому и значительному увеличению частоты вращения якоря – так называемому *разносу* двигателя – режиму, который может быть причиной аварии двигателя.

Скоростная характеристика без дополнительного сопротивления в ветви обмотки якоря называется *естественной*.

Если в цепь обмотки якоря включено дополнительное сопротивление  $R_d$ , то уравнение баланса напряжений для контура обмотки якоря принимает вид (-1.15)

$$U = E + (R_{я} + R_d) \cdot I_{я},$$

которому соответствует уравнение скоростной характеристики

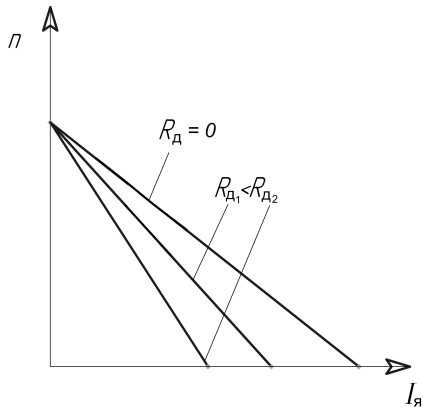


Рис. -1.34: Зависимость скоростных характеристик от дополнительного сопротивления.

$$n = \frac{U - (R_{я} + R_d) \cdot I_{я}}{c_E \Phi}. \quad (-1.34)$$

В отличие от скоростной характеристики без дополнительного сопротивления эта скоростная характеристика называется *искусственной*. На рис.34. показаны скоростные характеристики для различных значений дополнительного сопротивления. Для них характерно, что с увеличением дополнительного сопротивления пусковой ток двигателя уменьшается и равен

$$I_{яп} = \frac{U}{R_{я} + R_d}.$$

Это обстоятельство используется для улучшения пуска двигателя постоянного тока.

### Механическая характеристика.

Это зависимость частоты вращения якоря (ротора) от электромагнитного момента  $n(M)$  при постоянном напряжении питания  $U = const$  и постоянном токе возбуждения  $I_{в} = const$ <sup>9</sup>. Уравнение механической

<sup>9</sup>Последнее условие имеет место только для двигателей постоянного тока независимого и параллельного возбуждений.



характеристики получается из скоростной характеристики (-1.31), если учесть соотношение

$$I_{\text{я}} = \frac{M}{c_M \Phi},$$

вытекающее из (-1.26). В результате получим

$$n = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{R_{\text{я}} \cdot M}{c_E c_M \Phi^2}. \quad (-1.35)$$

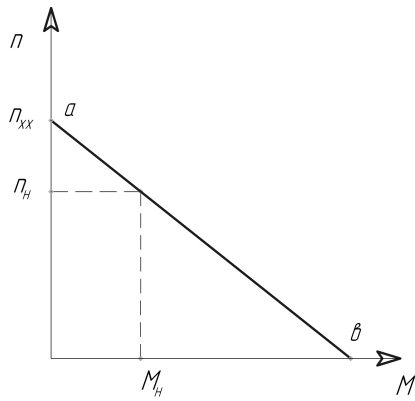


Рис. -1.35: Механическая характеристика двигателя постоянного тока.

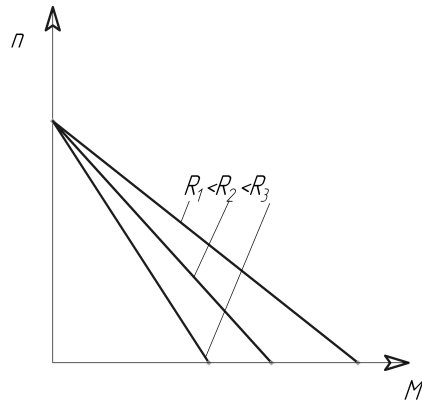


Рис. -1.36: Зависимость механических характеристик от дополнительного сопротивления.

На рис.35 показан качественный вид механической характеристики. Точка "а" описывает режим идеального холостого хода, когда нагрузка на валу двигателя полностью отсутствует. Точка "б" описывает режим пуска. Момент, развиваемый двигателем при пуске, равен

$$M = M_{\text{п}} = c_M \Phi \frac{U}{R_{\text{я}}}.$$

Механическая характеристика без дополнительного сопротивления в ветви обмотки якоря также называется *естественной*.

Если в ветвь обмотки якоря включено дополнительное сопротивление  $R_{\text{д}}$ , то уравнение механической характеристики принимает вид

$$n = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{(R_{\text{я}} + R_{\text{д}}) \cdot M}{c_E c_M \Phi^2}. \quad (-1.36)$$

В отличие от механической характеристики без дополнительного сопротивления эта механическая характеристика называется *искусственной*.

На рис.36 показаны механические характеристики для различных значений дополнительного сопротивления. Для них следует, что с увеличением дополнительного сопротивления пусковой момент двигателя уменьшается и равен

$$M_{\text{п}} = c_M \Phi \frac{U}{R_{\text{я}} + R_{\text{д}}}.$$

### 3.9. Пуск двигателя постоянного тока.

Возможны три способа пуска двигателя постоянного тока.

- Прямой путем подключения обмотки возбуждения индуктора и обмотки якоря к источнику постоянного напряжения.
- Пуск с помощью пусковых сопротивлений.
- Пуск при пониженном напряжении питания цепи якоря.

Прямой пуск двигателя постоянного тока мощностью свыше нескольких сотен ватт невозможен из-за большой величины пускового тока. Согласно (-1.16) пусковой ток двигателя равен

$$I_{\text{яп}} = \frac{U}{R_{\text{я}}}.$$

Для двигателей указанной мощности сопротивление обмотки якоря относительно невелико и поэтому пусковой ток при прямом включении двигателя в сеть недопустимо велик и составляет до пятидесяти значений номинального тока

$$I_{\text{п}} = (10 \div 50) I_{\text{н}}.$$

Прямой пуск применяется для двигателей постоянного тока мощностью менее нескольких сотен ватт. Для этих двигателей сопротивление обмотки якоря относительно велико и поэтому пусковой ток при прямом включении двигателя в сеть составляет до пяти значений номинального тока

$$I_{\text{п}} = (3 \div 5) I_{\text{н}}.$$

Наиболее широко применяется пуск двигателей постоянного тока с помощью пусковых сопротивлений. Этот способ использует тот факт,

что включение дополнительного сопротивления в ветвь обмотки якоря снижает величину пускового тока, при этом

$$I_{\text{яп}} = \frac{U}{R_{\text{я}} + R_{\text{д}}} . \quad (-1.37)$$

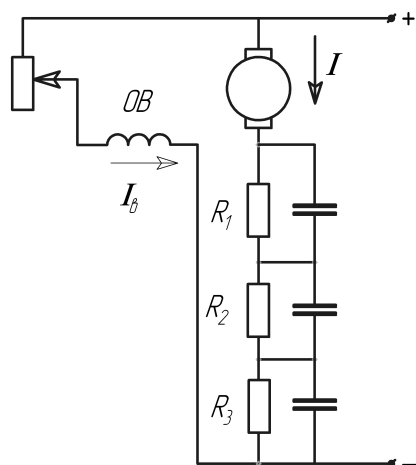


Рис. -1.37: Электрическая схема пуска двигателя постоянного тока.

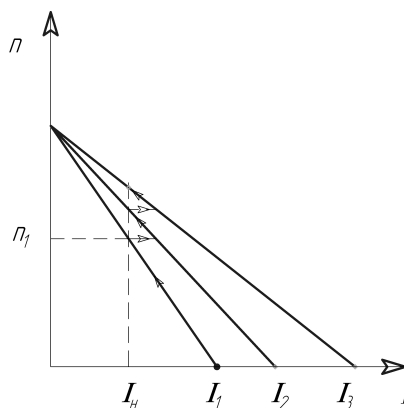


Рис. -1.38: К описанию процесса разгона двигателя постоянного тока.

Электрическая схема, применяемая при пуске двигателей постоянного тока, показана на рис.37. Здесь  $R_{\text{д1}}, R_{\text{д2}}, R_{\text{д3}}$  пусковые сопротивления,  $K_1, K_2, K_3$  – нормально замкнутые контакты. В начале пуска при  $n = 0$  все контакты разомкнуты, все сопротивления включены в ветвь обмотки якоря. Пусковой ток снижен до величины

$$I_{\text{яп3}} = \frac{U}{R_{\text{я}} + R_{\text{д1}} + R_{\text{д2}} + R_{\text{д3}}} .$$

Разгон двигателя происходит по искусственной скоростной характеристике (3) рис.38. После достижения скорости  $n = n_3$  и тока в обмотке якоря  $I_{\text{я}} = I_{\text{я3}}$  контакт  $K_3$  замыкается и двигатель переходит на искусственную скоростную характеристику (2) с пусковым током

$$I_{\text{яп2}} = \frac{U}{R_{\text{я}} + R_{\text{д1}} + R_{\text{д2}}} .$$

После дальнейшего разгона двигателя и достижения скорости  $n = n_2$  и тока в обмотке якоря  $I_{\text{я}} = I_{\text{я}2}$  контакт  $K_2$  замыкается и двигатель переходит на искусственную скоростную характеристику (1) с пусковым током

$$I_{\text{яп}1} = \frac{U}{R_{\text{я}} + R_{\text{д}1}}.$$

После дальнейшего разгона двигателя и достижения скорости  $n = n_1$  и тока в обмотке якоря  $I_{\text{я}} = I_{\text{я}1}$  контакт  $K_1$  замыкается и двигатель переходит на естественную скоростную характеристику и разгоняется до номинальных значений скорости и тока в обмотке якоря. На этом разгон двигателя заканчивается.

## 4. Примеры расчета.

### 4.1. Пример расчета. Вариант №6

Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения, номинальное напряжение которого равно  $U_{\text{н}} = 220\text{В}$ , при номинальной нагрузке потребляет ток  $I_{\text{н}} = 19,8\text{А}$ , а при холостом ходе потребляет ток  $I_0 = 2,0\text{А}$ . Номинальная скорость двигателя вращения равна  $n_{\text{н}} 960\text{об/мин}$ , сопротивление обмотки якоря двигателя равно  $R_{\text{я}} = 1,5\text{Ом}$ , сопротивление цепи обмотки возбуждения двигателя равно  $R_{\text{в}} = 150\text{Ом}$ . Магнитные и механические потери принять постоянными при всех режимах работы двигателя.

Определить:

- номинальную мощность двигателя  $P_{1\text{н}}$ ,
- номинальный вращающий момент  $M_{2\text{н}}$ ,
- номинальный коэффициент полезного действия  $\eta_{\text{н}}$ ,
- пусковой ток двигателя  $I_{\text{п}}$  без пускового реостата,
- сопротивление пускового реостата при условии  $I_{\text{п}} = 2,5I_{\text{н}}$ ,
- пусковой момент  $M_{2\text{п}}$  при пуске двигателя с реостатом.

1. Номинальная мощность двигателя  $P_{1\text{н}}$  определяется из соотношения (-1.16)

$$P_{1\text{н}} = U_{\text{н}} \cdot I_{\text{н}} = 220 \cdot 19,8 = 4356 \text{ Вт}.$$

2. Номинальный вращающий момент  $M_{2н}$  определяется из соотношения (-1.27)

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

Здесь скорость  $n_{н}$  задана, полезную механическую мощность  $P_{2н}$  надо найти. Она определяется из баланса мощности (-1.21) для номинального режима

$$P_{2н} = P_{1н} - P_{в} - P_{эн} - P_{сн} - P_{добн} - \Delta P_{мн}.$$

Здесь номинальная мощность  $P_{1н}$  уже вычислена. Остальные слагаемые необходимо найти. Начнем с потерь в цепи обмотки возбуждения. Эти потери не зависят от режима работы двигателя и определяются из соотношения (-1.17)

$$P_{в} = R_{в} \cdot I_{в}^2.$$

Здесь сопротивление цепи обмотки возбуждения задано.

2.1. Ток в обмотке возбуждения определяется из соотношения

$$I_{в} = \frac{U_{н}}{R_{в}} = \frac{220}{150} = 1,47 \text{ А}.$$

2.2. Отсюда потери в цепи обмотки возбуждения из соотношения (-1.17)

$$P_{в} = R_{в} \cdot I_{в}^2 = 150 \cdot 1,47^2 = 323 \text{ Вт}.$$

Теперь найдем потери в обмотке якоря в номинальном режиме  $P_{эн}$ . Они определяются из соотношения (-1.18)

$$P_{эн} = R_{я} \cdot I_{ян}^2.$$

Здесь сопротивление обмотки якоря задано, а ток в обмотке якоря определяется из соотношения (-1.9).

2.3. Ток в обмотке якоря в номинальном режиме

$$I_{ян} = I_{н} - I_{в} = 19,8 - 1,5 = 18,3 \text{ А}.$$

2.4. Потери в обмотке якоря в номинальном режиме  $P_{эн}$  в соответствии с соотношением (-1.17)

$$P_{эн} = R_{я} \cdot I_{ян}^2 = 1,5 \cdot 18,3^2 = 502,3 \text{ Вт}.$$

Нам остается найти потери в стали и механические потери в номинальном режиме  $P_{\text{сн}} + P_{\text{добн}} + \Delta P_{\text{мн}}$ . По условию эти потери принимаются постоянными при всех режимах работы двигателя. Поэтому можно считать, что эти потери равны потерям в стали и механическим потерям в режиме холостого хода, то есть

$$P_{\text{сн}} + P_{\text{добн}} + \Delta P_{\text{мн}} = (P_{\text{с}} + P_{\text{доб}} + \Delta P_{\text{м}})_{\text{хх}}.$$

Потери в стали и механические потери найдем из баланса мощности (-1.21) в режиме холостого хода

$$P_{1\text{хх}} = P_{\text{в}} + P_{\text{эхх}} + (P_{\text{с}} + P_{\text{доб}} + \Delta P_{\text{м}})_{\text{хх}}.$$

При этом учтено, что полезная механическая мощность двигателя в режиме холостого хода равна нулю  $P_{2\text{хх}} = 0$ . Таким образом,

$$(P_{\text{с}} + P_{\text{доб}} + \Delta P_{\text{м}})_{\text{хх}} = P_{1\text{хх}} - P_{\text{в}} - P_{\text{эхх}}.$$

Мощность двигателя в режиме холостого хода  $P_{1\text{хх}}$  определяется из соотношения (-1.16)

$$P_{1\text{хх}} = U_{\text{н}} \cdot I_{\text{хх}}.$$

Здесь ток холостого хода  $I_{\text{хх}}$  задан  $I_{\text{хх}} = I_0 = 2,0 \text{ А}$ .

2.5. Таким образом, мощность двигателя в режиме холостого хода  $P_{1\text{хх}}$

$$P_{1\text{хх}} = U_{\text{н}} \cdot I_{\text{хх}} = 220 \cdot 2,0 = 440 \text{ Вт}$$

Потери в цепи обмотки возбуждения не зависят от режима работы двигателя. Они были сосчитаны в п.2.2  $P_{\text{в}} = 323 \text{ Вт}$ . Теперь найдем потери в обмотке якоря в режиме холостого хода  $P_{\text{хх}}$ . Они определяются из соотношения (-1.18)

$$P_{\text{эхх}} = R_{\text{я}} \cdot I_{\text{яхх}}^2.$$

Здесь сопротивление обмотки якоря задано, а ток в обмотке якоря определяется из соотношения (-1.9).

2.6. Ток в обмотке якоря в режиме холостого хода

$$I_{\text{яхх}} = I_{\text{хх}} - I_{\text{в}} = 2,0 - 1,5 = 0,5 \text{ А}.$$

2.7 Потери в обмотке якоря в режиме холостого хода  $P_{\text{эхх}}$

$$P_{\text{эхх}} = R_{\text{я}} \cdot I_{\text{яхх}}^2 = 1,5 \cdot 0,5^2 = 0,375 \text{ Вт}.$$

2.8. В результате находим потери в стали и механические потери в номинальном режиме

$$P_{\text{сн}} + P_{\text{добн}} + \Delta P_{\text{мн}} = (P_{\text{с}} + P_{\text{доб}} + \Delta P_{\text{м}})_{\text{xx}} = P_{1\text{xx}} - P_{\text{в}} - P_{\text{эxx}} = 440 - 323 - 0,375 = 116,625 \text{ Вт}.$$

2.9. Теперь мы имеем возможность найти полезную механическую мощность для номинального режима

$$P_{2\text{н}} = P_{1\text{н}} - P_{\text{в}} - P_{\text{эн}} - P_{\text{сн}} - P_{\text{добн}} - \Delta P_{\text{мн}} = 4356 - 323 - 502,3 - 116,625 = 3414,075 \text{ Вт}.$$

2.10. и номинальный вращающий момент

$$M_{2\text{н}} = 9,55 \cdot \frac{P_{2\text{н}}}{n_{\text{н}}} = 9,55 \cdot \frac{3414,075}{960} = 33,96 \text{ Н м}.$$

3. Номинальный коэффициент полезного действия  $\eta_{\text{н}}$  определяется из соотношения (-1.23)

$$\eta = \frac{P_{2\text{н}}}{P_{1\text{н}}} \cdot 100\% = \frac{3414,075}{4356} \cdot 100\% = 78,4\%.$$

4. Пусковой ток двигателя  $I_{\text{п}}$  без пускового реостата определяется из соотношения (-1.37)

$$I_{\text{п}} = I_{\text{яп}} + I_{\text{в}} = \frac{U_{\text{н}}}{R_{\text{я}}} + I_{\text{в}} = \frac{220}{1,5} + 1,5 = 146,7 + 1,5 = 148,2 \text{ А}.$$

5. Сопротивление пускового реостата при условии  $I_{\text{п}} = 2,5I_{\text{н}}$  определяется из соотношений (-1.9) и (-1.37)

$$I_{\text{п}} = I_{\text{яп}} + I_{\text{в}} = \frac{U_{\text{н}}}{R_{\text{я}} + R_{\text{д}}} + I_{\text{в}}.$$

Откуда

$$R_{\text{д}} = \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{п}} - I_{\text{в}}} - R_{\text{я}} = \frac{U_{\text{н}}}{2,5I_{\text{н}} - I_{\text{в}}} - R_{\text{я}} = \frac{220}{2,5 \cdot 19,8 - 1,5} - 1,5 = 3,08 \text{ Ом}.$$

6. Пусковой момент  $M_{2\text{п}}$  при пуске двигателя с реостатом.

Этот момент найдем, учитывая, что при пуске вращающий момент равен электромагнитному (смотри соотношение (-1.30))  $M_{\Pi} = M_{2\Pi}$ . Кроме того из соотношения (-1.26) следует, что отношение электромагнитных моментов для различных режимов работы двигателя равно отношению соответствующих токов в обмотке якоря

$$\frac{M_{\Pi}}{M_{\Pi}} = \frac{I_{\text{яп}}}{I_{\text{ян}}}.$$

Таким образом, имеем

$$M_{2\Pi} = M_{\Pi} \frac{I_{\text{яп}}}{I_{\text{ян}}}.$$

Номинальный электромагнитный момент найдем из (-1.25)

$$M_{\Pi} = 9,55 \cdot \frac{P_{\text{эмн}}}{n_{\Pi}},$$

где  $P_{\text{эмн}}$  определяется из соотношения (-1.22).

6.1. Электромагнитная мощность в номинальном режиме

$$P_{\text{эмн}} = P_{1\Pi} - P_{\text{в}} - P_{\text{эн}}.$$

Мощность, потребляемая двигателем в номинальном режиме сосчитана в п.1  $P_{1\Pi} = 4356$  Вт. Мощность, цепи возбуждения сосчитана в п.2.2  $P_{\text{в}} = 323$  Вт. Мощность, в цепи обмотки якоря в номинальном режиме сосчитана в п.2.4  $P_{\text{эн}} = 502,3$  Вт. Таким образом,

$$P_{\text{эмн}} = P_{1\Pi} - P_{\text{в}} - P_{\text{эн}} = 4356 - 323 - 502,3 = 3530,7 \text{ Вт}.$$

6.2. Отсюда рассчитываем электромагнитный момент двигателя в номинальном режиме

$$M_{\Pi} = 9,55 \cdot \frac{P_{\text{эмн}}}{n_{\Pi}} = 9,55 \cdot \frac{3530,7}{960} = 35,1 \text{ Н м}.$$

6.2. Ток в обмотке якоря в режиме пуска рассчитываем, исходя из соотношения (-1.37)

$$I_{\text{яп}} = \frac{U_{\Pi}}{R_{\text{я}} + R_{\text{д}}} = \frac{220}{1,5 + 3,08} = 48 \text{ А}.$$

Так как ток в обмотке якоря в номинальном режиме уже сосчитан  $I_{\text{ян}} = 18,3$  А в п.2.3, то далее определяем  $M_{2\Pi}$ .

6.3. Пусковой момент  $M_{2\Pi}$  при пуске двигателя с реостатом.

$$M_{2\Pi} = M_{\Pi} \frac{I_{\text{яп}}}{I_{\text{ян}}} = 35,1 \frac{48}{18,3} = 92,1 \text{ Н м}.$$



#### 4.2. Пример расчета. Вариант №26

Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения, номинальное напряжение которого равно  $U_n = 110$  В, развивает номинальную мощность  $P_n = 60 \cdot 10^3$  Вт. Номинальная скорость вращения равна  $n_n = 1225$  об/мин, номинальный коэффициент полезного действия равен  $\eta_n = 86,5\%$ . Потери мощности в цепи якоря  $P_{\text{я}} = 5,2 \cdot 10^{-2} \cdot 60 \cdot 10^3 = 3120$  Вт. Потери мощности в цепи возбуждения  $P_{\text{в}} = 4,8 \cdot 10^{-2} \cdot 60 \cdot 10^3 = 2880$  Вт.

Определить:

- ток в цепи обмотки возбуждения  $I_{\text{в}}$ ,
- ток в обмотке якоря при номинальной нагрузке  $I_{\text{ян}}$ ,
- номинальный вращающий момент  $M_n$ ,
- сопротивление пускового реостата при условии  $I_{\text{п}} = 2,5I_n$ ,
- пусковой момент  $M_{\text{п}}$  при пуске двигателя с реостатом.

1. Ток в цепи обмотки возбуждения  $I_{\text{в}}$  определяется из соотношения (-1.17)

$$I_{\text{в}} = \frac{P_{\text{в}}}{U_n} = \frac{2880}{110} = 26,2 \text{ А}.$$

2. Ток в обмотке якоря при номинальной нагрузке  $I_{\text{ян}}$  определяется из соотношения (-1.9)

$$I_{\text{ян}} = I_n - I_{\text{в}} = \frac{P_n}{U_n} - I_{\text{в}} = \frac{60 \cdot 10^3}{110} - 26,2 = 545,4 - 26,2 = 519,2 \text{ А}.$$

3. Номинальный вращающий момент  $M_{2n}$  определяется из соотношения (-1.27)

$$M_{2n} = 9,55 \cdot \frac{P_{2n}}{n_n}.$$

Здесь скорость  $n_n$  задана, полезную механическую мощность  $P_{2n}$  надо найти. 3.1. Полезная механическая мощность  $P_{2n}$  определяется из соотношения (-1.23) для номинального режима

$$P_{2n} = \frac{\eta}{100} \cdot P_{1n} = \frac{86,5}{100} \cdot 60 \cdot 10^3 = 51,9 \cdot 10^3 \text{ Вт}.$$

3.2. Отсюда номинальный вращающий момент  $M_{2н}$

$$M_{2н} = 9,55 \cdot \frac{P_{2н}}{n_{н}} = 9,55 \cdot \frac{51,9 \cdot 10^3}{1225} = 404,6 \text{ Н м}.$$

4. Сопротивление пускового реостата при условии  $I_{п} = 2,5I_{н}$  определяется из соотношений (-1.9) и (-1.37)

$$I_{п} = I_{яп} + I_{в} = \frac{U_{н}}{R_{я} + R_{д}} + I_{в}.$$

Откуда

$$R_{д} = \frac{U_{н}}{I_{п} - I_{в}} - R_{я} = \frac{U_{н}}{2,5I_{н} - I_{в}} - R_{я}.$$

4.1. Здесь номинальный ток двигателя  $I_{н}$  определяется из соотношения (-1.9)

$$I_{н} = I_{ян} + I_{в} = 519,2 + 26,2 = 543,4 \text{ А}.$$

4.2. Сопротивление обмотки якоря  $R_{я}$  определяется из соотношения (-1.18)

$$R_{я} = \frac{P_{ян}}{I_{ян}^2} = \frac{3120}{519,2^2} = 0,0116 \text{ Ом}.$$

4.3. В результате сопротивление пускового реостата при условии  $I_{п} = 2,5I_{н}$  равно

$$R_{д} = \frac{U_{н}}{2,5I_{н} - I_{в}} - R_{я} = \frac{110}{2,5 \cdot 543,4 - 26,2} - 0,0116 = 0,071 \text{ Ом}.$$

5. Пусковой момент  $M_{2п}$  при пуске двигателя с реостатом.

Этот момент найдем, учитывая, что при пуске вращающий момент равен электромагнитному (смотри соотношение (-1.30))  $M_{п} = M_{2п}$ . Кроме того из соотношения (-1.26) следует, что отношение электромагнитных моментов для различных режимов работы двигателя равно отношению соответствующих токов в обмотке якоря

$$\frac{M_{п}}{M_{н}} = \frac{I_{яп}}{I_{ян}}.$$

Таким образом, имеем

$$M_{2п} = M_{н} \frac{I_{яп}}{I_{ян}}.$$

Номинальный электромагнитный момент найдем из (-1.25)

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

где  $P_{\text{эмн}}$  определяется из соотношения (-1.22).

5.1. Электромагнитная мощность в номинальном режиме

$$P_{\text{эмн}} = P_{1\text{н}} - P_{\text{в}} - P_{\text{эн}} = 60000 - 2880 - 3120 = 54 \cdot 10^3 \text{ Вт}.$$

5.2. Отсюда рассчитываем электромагнитный момент двигателя в номинальном режиме

$$M_{\text{н}} = 9,55 \cdot \frac{P_{\text{эмн}}}{n_{\text{н}}} = 9,55 \cdot \frac{54 \cdot 10^3}{1225} = 421 \text{ Н м}.$$

6.2. Ток в обмотке якоря в режиме пуска рассчитываем, исходя из соотношения (-1.37)

$$I_{\text{яп}} = \frac{U_{\text{н}}}{R_{\text{я}} + R_{\text{д}}} = \frac{110}{0,0116 + 0,071} = 1331 \text{ А}.$$

Так как ток в обмотке якоря в номинальном режиме уже сосчитан  $I_{\text{ян}} = 519,2 \text{ А}$  в п.2.3, то далее определяем  $M_{2\text{п}}$ .

6.3. Пусковой момент  $M_{2\text{п}}$  при пуске двигателя с реостатом.

$$M_{2\text{п}} = M_{\text{н}} \frac{I_{\text{яп}}}{I_{\text{ян}}} = 421 \frac{1331}{519,2} = 1079 \text{ Н м}.$$

## 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

Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения.

Учебное пособие по курсу «Общая электротехника»

Подписано в печать      Заказ №      Тираж 100

---

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