

**Министерство образования и науки Российской Федерации
Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского**

**Факультет энергетический
Кафедра электрооборудования и физики**

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Задание для курсовой работы

Иркутск 2020

УДК 62-83

Допущено методическим советом энергетического факультета
(протокол № 4 от 15 декабря 2020 года)

Рецензент:

Очиров В.Д. - к.т.н., заведующий кафедрой энергообеспечения и теплотехники Иркутского государственного аграрного университета им. А.А. Ежевского.

Боннет В. В., Логинов А.Ю., Прудников А.Ю.

Методические указания по изучению дисциплины «Электрические машины» для студентов очного и заочного обучения направления подготовки 35.03.06 – Агроинженерия, профиль «Электрооборудование и электротехнологии в АПК» / В.В. Боннет, А.Ю. Логинов, А.Ю. Прудников; Иркут. гос. аграр. ун-т им. А. А. Ежевского. – Молодежный: Изд-во ИрГАУ, 2020. – 24 с.

В учебно-методическом указании приведены теоретические сведения, справочный материал к выполнению курсовой работы по дисциплине «Электрические машины» для студентов очного и заочного обучения направления подготовки 35.03.06 – Агроинженерия, профиль «Электрооборудование и электротехнологии в АПК».

© Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского, 2020

1. РАСЧЕТ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Трехфазный асинхронный двигатель включен в сеть с напряжением $U_H = 380$ В при схеме соединения обмоток статора в звезду. Величины, характеризующие номинальный режим работы двигателя, приведены в таблице 3. полезная мощность на валу P_H ; потребляемый ток I_H ; частота вращения ротора n_H ; коэффициент мощности $\cos\varphi_H$, КПД. Кроме того, заданы величины тока холостого хода I_0 , сопротивление обмотки статора R_{1x} при температуре 20°C , мощность потерь холостого хода p_0 , мощность потерь короткого замыкания $p_{кз}$ при токе обмотки статора I_H и напряжении короткого замыкания U_K .

Таблица 1.

Данные к расчёту № 1

№ вар.	P_H , кВт	I_H , А	n_H , об/мин	η , %	$\cos\varphi_H$	R_{1x} , Ом	I_0 , А	p_0 , Вт	$P_{кз}$, Вт	U_K , В
1	3,0	7	1420	81	0,81	1,83	2,5	200	440	60
2	4,0	9	1430	85,5	0,84	0,8	3,3	250	550	58
3	5,5	11	1450	85	0,85	0,59	4,6	350	760	59
4	7,5	15	1455	83	0,83	0,39	6,1	460	871	53
5	11	22	1460	88,5	0,86	0,27	8,0	530	1250	60
6	15	29	1460	90	0,87	0,17	10,5	560	1670	64
7	18,5	35	1460	90,5	0,89	0,15	12,4	720	1680	54
8	22	42	1460	91	0,88	0,10	16	930	2010	51
9	30	59	1475	91	0,86	0,071	21	1400	3500	55
10	55	108,5	1440	91,5	0,84	0,038	36,5	1620	4100	46
11	75	149	1450	90	0,85	0,032	47,5	2100	7200	61
12	2,2	5	960	78	0,74	1,68	2,7	145	550	86
13	3	7	960	79	0,79	1,3	3,6	167	620	75
14	4	9	960	80	0,80	1,23	4,5	246	730	71
15	5,5	12	950	82	0,82	0,73	5,6	340	910	69
16	7,5	16	970	87	0,8	0,49	5,8	445	1320	81
17	11	23	970	88,5	0,82	0,34	7,1	510	1570	78
18	15	31	970	89	0,82	0,30	9,0	580	1750	69
19	17	34,7	970	88	0,84	0,2	11	620	2000	65
20	30	45	970	87	0,84	0,12	17	930	2040	52
21	30	59,5	970	91	0,84	0,09	18,7	1100	2210	44
22	40	78,5	975	91	0,85	0,06	23	1300	3100	49
23	55	108	960	89	0,87	0,058	27	1670	6000	71
24	75	114	960	91	0,84	0,034	38,6	2240	6400	60
25	3,0	198	1450	91	0,85	0,021	63	3100	8650	61
26	3,0	6,7	1435	81	0,83	1,30	2,7	180	450	70

27	4,0	8,8	1430	83	0,82	0,81	3,5	270	540	68
28	2,2	5,7	950	84	0,83	1,66	2,6	140	410	70
29	3,0	7,6	940	81	0,79	1,19	3,4	230	35	66
30	5,5	1,5	450	82	0,81	0,58	4,3	10	80	65
31	7,5	15,1	450	83	0,82	0,38	5,6	360	780	67
32	4,0	9,8	955	84	0,81	1,14	4,4	250	680	69
33	5,5	12,3	965	81	0,80	0,72	6,2	320	830	72
34	3,0	7,8	710	79	0,79	1,42	3,2	190	550	70
35	4,0	10,6	710	82	0,83	1,03	5,3	330	680	68
36	11,0	22,0	1460	85	0,84	0,28	8,8	570	1200	65
37	15,0	29,3	1465	86	0,85	0,21	11,5	720	1800	66
38	7,5	16,5	970	82	0,84	0,48	6,1	390	980	67
39	11,0	22,6	975	83	0,83	0,32	8,4	550	1350	64
40	5,5	13,6	720	81	0,81	0,62	7,1	430	820	70
41	7,5	17,7	730	82	0,83	0,39	8,5	500	1060	72
42	18,5	35,7	1465	86	0,85	0,22	14,0	930	2200	65
43	22,5	41,3	1470	87	0,86	0,17	18,0	1340	2600	66
44	15,0	30,0	975	86	0,85	0,24	11,0	650	2050	68
4Б	18,5	36,8	875	87	0,85	0,19	13,8	750	2350	66
46	11,0	25,6	730	84	0,83	0,27	13,0	800	1600	67
47	15,0	32,0	730	85	0,84	0,24	16,5	920	2250	70
48	37,0	68,8	1475	88	0,87	0,13	20,0	1200	4520	69
49	5,5	100	1480	89	0,88	0,10	35,0	1900	6050	63
50	30,0	56,0	980	87	0,85	0,13	17,5	1260	3630	67

Содержание задания

1. Начертить электромагнитную схему асинхронного двигателя.

2. Построить рабочие характеристики n , M , I , P_1 , η , $\cos\varphi = f(P_2)$ и механическую характеристику асинхронного двигателя $n = f(M)$.

Методические рекомендации

К пункту 1. На электромагнитной схеме асинхронной машины следует показать статор, ротор, обмотки статора и ротора, а также путь замыкания основного потока соответственно числу (пар) полюсов машины, которое можно определить, как $p = 3000/n_n$

В этом случае берется ближайшее целое число, определяющее количество полюсов при частоте 50 Гц.

К пункту 2. Построение рабочих характеристик и механической характеристики с помощью круговой диаграммы.

Построение рабочих и механической характеристик с помощью круговой диаграммы

Круговая диаграмма строится для одной фазы асинхронного двигателя и представляет собой геометрическое место концов векторов тока обмотки статора при постоянных значениях частоты и подводимого напряжения и изменении скольжения от нуля до $\pm \infty$.

Для построения упрощенной диаграммы асинхронного двигателя достаточно провести два предельных опыта — холостого хода и короткого замыкания, из которых за исходные принимаются следующие величины (в нашем случае из данных индивидуального задания):

1. Величина тока холостого хода I_0 , А при номинальном напряжении U_H
2. Мощность потерь холостого хода P_0 , Вт при номинальном напряжении и частоте.
3. Фаза φ_0 тока холостого хода I_0 по отношению к подводимому фазному напряжению $U_{H\phi}$, определяемая из соотношения

$$\varphi_0 = \arccos \cos \varphi_0; \quad \cos \varphi_0 = \frac{P_0}{3U_{\text{н}\phi} I_0}; \quad U_{\text{н}\phi} = \frac{U_{\text{н}}}{\sqrt{3}}$$

4. Величина тока короткого замыкания I_K при номинальном подводимом напряжении U_H , получаемая перерасчетом по формуле

$$I_K = I_n \frac{U_n}{U_K}, \text{ А}$$

5. Мощность потерь короткого замыкания P_K при номинальном подводимом напряжении, полученная перерасчетом по формуле

$$P_K = P_{\text{нн}} \left(\frac{I_K}{I_n} \right)^2$$

6. Фаза φ_K тока короткого замыкания I_K по отношению к фазному подведенному напряжению $U_{\text{н}\phi}$, определяемая из соотношения

$$\varphi_K = \arccos \cos \varphi_K, \quad \text{где } \cos \varphi_K = \frac{P_K}{3U_{\text{н}\phi} I_K}$$

7. Активное сопротивление фазной обмотки статора R_1 , приведенное к расчетной рабочей температуре 75°C по формуле

$$R_1 = R_{1x} \frac{310}{235 + \Theta_x}, \text{ Ом} \quad (1.1)$$

где R_{1x} — сопротивление холодной обмотки при $\Theta_x = 20^\circ\text{C}$.

8. Активное сопротивление короткого замыкания двигателя, величина которого определяется из соотношения:

$$R_x = \frac{P_x}{3I_x^2}, \text{ Ом} \quad (1.2)$$

9. Активное сопротивление фазы обмотки ротора R'_2 , приведенное к обмотке статора:

$$R'_2 = R_x - R_1, \quad (1.3)$$

Построение круговой диаграммы

1. На листе миллиметровой бумаги размером (180—220) X (250—300) мм наносят оси координат, начало которых в левом нижнем углу листа (рис. 1.1). По оси ординат в произвольном масштабе откладывают вектор фазного номинального напряжения $U_{\text{нф}}$.

2. Величину масштаба тока m_i , А/мм выбирают так, чтобы отрезок $OK = I_k/m_i$ удобно помещался на листе бумаги и был бы равен 200—250 мм. Значение m_i округляют до ближайшего удобного для пользования числа.

3. Строят вектор тока I_0 . Для этого под углом φ_0 к вектору $U_{\text{нф}}$ проводят прямую, на которой из начала координат (точка О) откладывают отрезок $OH = I_0/m_i$, мм. Через точку Н проводят прямую Hh , параллельную оси абсцисс.

4. Строят вектор тока I_k . Для этого из начала координат проводят прямую под углом φ_k к вектору напряжения $U_{\text{нф}}$, на которой откладывают отрезок $OK = I_k/m_i$, мм.

5. Строят окружность через точки Н и К, центр которой находят следующим образом. Точки Н и К соединяют прямой и из середины ее восстанавливают перпендикуляр до пересечения с линией Hh в точке O_2 , которая является центром искомой окружности.

Определение токов. Из точки O в масштабе токов с помощью циркуля откладывают вектор номинального тока статора I_H так, чтобы конец этого вектора (точка D) лежал на окружности токов, $OD = I_H/m_i$, мм.

Затем, соединив точки D и H , получают треугольник токов ODH , стороны которого определяют токи

$$I_0 = m_i OH; \quad I_2' = m_i HD; \quad I_1 = m_i OD$$

Кроме того, опустив перпендикуляр из точки D на ось абсцисс ($D - a$), получают прямоугольный треугольник ODa , из которого определяют активную и реактивную составляющие тока статора:

$$I_{1a} = m_p Da; \quad I_{1p} = m_i Oa$$

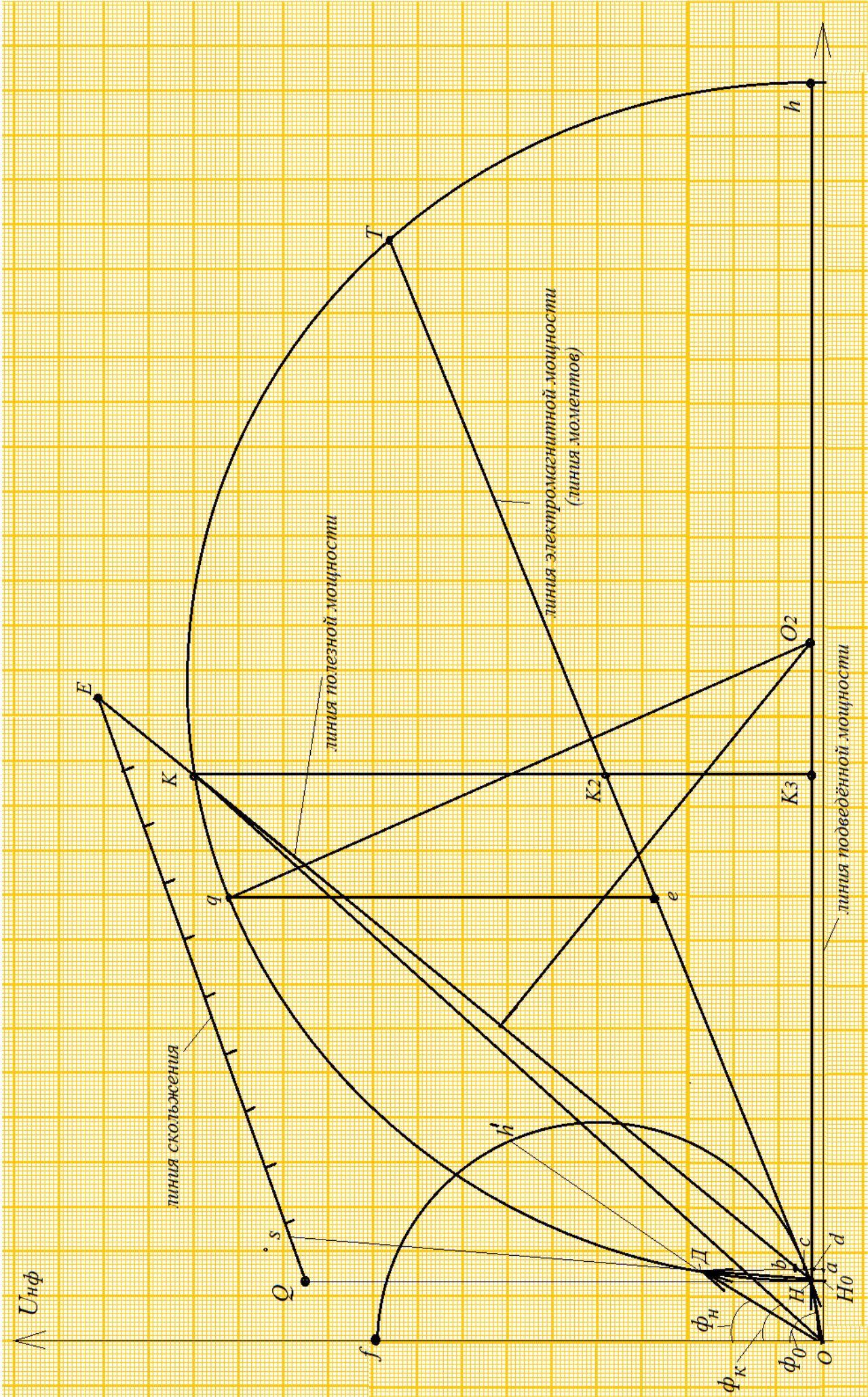
Подведенная мощность P_1 . Потребляемая трехфазным двигателем мощность из сети определяется по формуле:

$$P_1 = 3U_{1\phi}I_1\cos\phi_1$$

Поскольку $U_{1\phi} = U_{1H} = \text{const}$, а $I_1\cos\phi_1 = I_{1a}$, то мощность P_1 пропорциональна активной составляющей тока статора. На круговой диаграмме мощность P_1 характеризуется отрезком Da , то есть $P_1 = m_p Da$, где $m_p = 3U_{1\phi}m_i$ - масштаб мощности, Вт/мм.

Потребляемую двигателем мощность из сети на диаграмме считывают по прямой от оси абсцисс, называемой линией подведенной мощности, до заданной точки на окружности токов.

Полезная мощность на валу P_2 . Полезную мощность асинхронного двигателя отсчитывают по вертикали от окружности токов до прямой, соединяющей две точки на окружности токов, в которых полезная мощность равна нулю. Одной из таких точек на диаграмме является точка H , соответствующая холостому ходу двигателя, а другой - точка K , соответствующая короткому замыканию. В режиме к.з. ротор двигателя неподвижен ($n = 0$) при номинальном подведенном к статору напряжении, следовательно, $P_2 = 0$. Для заданной точки D на окружности токов полезная мощность равна $P_2 = m_p Dv$.



Электромагнитная мощность и электромагнитный момент. Величина электромагнитной мощности асинхронного двигателя (мощности, которая передается вращающимся магнитным полем через воздушный зазор от статора к ротору) отсчитывается на круговой диаграмме по перпендикуляру к диаметру окружности от точки на окружности токов до линии электромагнитной мощности. Для построения этой линии необходимо провести прямую через две точки окружности токов, в которых электромагнитная мощность равна нулю. Такими точками являются Н и Т. Первая точка Н соответствует скольжению $s \approx 0$, поскольку ротор двигателя при этом вращается с частотой, практически равной частоте вращения магнитного поля статора n_1 . Вторая точка Т соответствует скольжению $S = \pm \infty$, то есть бесконечно большой частоте вращения ротора. Обмотка ротора при этом обладает реактивным сопротивлением и ток в ней будет тоже реактивным, а активная составляющая тока ротора, обуславливающая активную электромагнитную мощность, будет равна нулю. Если точку Н можно получить по данным опыта холостого хода, то точку Т экспериментально получить нельзя, так как при этом пришлось бы вращать ротор с частотой $n = \pm \infty$, что нереально. Поэтому линию электромагнитной мощности обычно строят по точкам Н и K_2 ; ее определяют путем деления отрезка KK_3 на две части, используя соотношение

$$\frac{R_x}{R_1} = \frac{KK_3}{K_2K_3}, \text{ то есть } K_2K_3 = KK_3 \frac{R_1}{R_x}$$

Для заданной точки Д на окружности токов электромагнитная мощность двигателя равна $P_{эм} = m_p Dc$.

Электромагнитный момент двигателя оценивают из соотношений,

$$M = \frac{P_{эм}}{\Omega_1}; \quad \Omega_1 = \frac{314}{p}; \quad M = m_m Dc; \quad m_m = \frac{m_p H_m}{\Omega_{1MM}}$$

Линию НТ называют также линией моментов.

Коэффициент мощности. Для определения коэффициента мощности

$\cos\varphi$ асинхронного двигателя по круговой диаграмме строят полуокружность с диаметром of на оси ординат. Тогда для заданной точки D на окружности токов имеем

$$\cos\varphi = \frac{ph'}{of}$$

Для удобства расчетов целесообразно диаметр of полуокружности принять равным 100мм. В этом случае

$$\cos\varphi = \frac{Oh'}{100}$$

Скольжение. Скольжение s на круговой диаграмме определяется по шкале скольжения, для построения которой в точке H_0 на оси абсцисс восстанавливают перпендикуляр H_0Q , проходящий через точку H . Затем из произвольно выбранной точки Q проводят прямую QE параллельно линии электромагнитной мощности HT до пересечения с продолжением линии полезной мощности HK в точке E . Отрезок QE делят на 100 равных частей и получают шкалу скольжения, по которой для определения скольжения двигателя пользуются вектором приведенного тока ротора \dot{I}_2 как стрелкой. Для заданной точки D на окружности токов скольжение определяют продолжением вектора \dot{I}_2 (линии HD) до пересечения со шкалой скольжения в точке s . Соответствующая этой точке цифра на шкале скольжения выражает величину скольжения в процентах.

КПД двигателя. КПД двигателя оценивают отношением $\eta = P_2/P_1$. Потребляемая P_1 и полезная P_2 мощности двигателя определяют из круговой диаграммы: $P_1 = m_p Da$ и $P_2 = m_p Dв$, тогда $\eta = Dв/Da$

Общие потери в двигателе $\sum p$ характеризуются отрезком в масштабе мощности, то есть $\sum p = m_{pав}$, из которых: $m_{pав}$ постоянные потери (потери в стали, механические и добавочные); $m_p cd$ - потери в меди статора; $m_p bc$ - потери в меди ротора.

Начальный пусковой ток и момент. Начальный пусковой ток и момент двигателя определяются положением точки K на окружности токов, соответствующих скольжению $S = 1$ (100%), пусковой момент двигателя в масштабе мо-

мента характеризуется отрезком KK_2 , то есть $M_n = m_m KK_2$, а начальный пусковой ток в масштабе определяется отрезком OK , то есть $I_n = m_i OK$.

Если точка D на окружности токов соответствует номинальному режиму работы двигателя, то кратность пускового момента и пускового тока оцениваются по состоянию отрезков

$$\frac{M_n}{M_n} = \frac{KK_2}{Dc}, \quad \text{и} \quad \frac{I_n}{I_n} = \frac{OK}{OD}$$

Перегрузочная способность двигателя. Перегрузочная способность двигателя оценивается отношением максимального момента M_m к номинальному M_n . Для определения максимального момента двигателя на круговой диаграмме из точки O_2 проводят перпендикуляр к линии электромагнитной мощности (НТ) и продолжают его до пересечения с окружностью токов в точке q . Из точки q проводят прямую параллельно оси ординат до встречи с линией НТ в точке e . Отрезок qe в масштабе моментов определяют величину максимального момента, то есть $M_m = m_m qe$.

Если точка D на окружности токов соответствует номинальному режиму работы двигателя, то перегрузочная способность его оценивается соотношением

$$\frac{M_m}{M_n} = \frac{qe}{Dc}$$

К пункту 2. Рабочие характеристики асинхронного двигателя строят в зависимости от полезной мощности на валу двигателя P_2 , откладываемой по оси абсцисс в единицах мощности или в относительных единицах (о.е.). На оси ординат в соответствующем масштабе откладывают следующие величины двигателя: n - частоту вращения ротора, об/мин; M - вращающий момент, Нм; I_1 - значение величины тока статора, А; P_1 - потребляемая из сети мощность, Вт или кВт; η - КПД, %; $\cos\phi$ - коэффициент мощности. Все эти данные определяют по круговой диаграмме для шести точек по полезной мощности: $P_2i = 0; 0,25; 0,50; 0,75; 1,00; 1,25$; от P_n . При этом, прежде всего, определяют рабочую точку на круговой диаграмме, соответствующей заданному значению полезной мощности

P_{2i} Для этого находят длину отрезка прямой, соответствующей заданному значению P_{2i} на диаграмме, например, для мощности $P_{2i}=P_H$ это отрезок $Db = P_H/m_p$. Этот отрезок встраивают между окружностью токов и линией полезной мощности перпендикулярно к диаметру окружности токов Hh . Таким образом находят рабочую точку D , соответствующую номинальной мощности P_H . Аналогично определяют рабочие точки на круговой диаграмме и при других заданных значениях полезной мощности двигателя P_{2i} по соответствующим величинам отрезков, длина которых принимается из следующего ряда значений: (0; 0,25; 0,50; 0,75; 1,00; 1,25) Db . Частота вращения в каждой рабочей точке n_i - вычисляется как:

$$n_i = n_1(1-S_i),$$

где S_i - величина скольжения в i -й точке, определяемая непосредственно из круговой диаграммы, n_1 - частота вращения магнитного поля двигателя, которую определяют из зависимости $n_1 = 60f_1/p$.

При частоте питающего напряжения $f = 50$ Гц числу пар полюсов двигателя $p=1, 2, 3, \dots$, соответствует следующая шкала частоты вращения магнитного поля: 3000, 1500, 1000, ..., 3000 об/мин. В индивидуальном задании приведено значение номинальной частоты вращения ротора двигателя n_H которая меньше n_1 на величину скольжения $S_H = (2-6) \%$,

$$\text{т.е. } n_H = n_1(1-S_H).$$

Значение величин n_i , M_i , I_{1i} , η_i и $\cos\varphi_i$ оценивают при соответствующем значении P_{2i} непосредственно из круговой диаграммы, а результаты заносят в таблицу 2. Рабочие характеристики асинхронного двигателя строят по данным таблицы 4 на листе миллиметровой бумаги размером 150X150 мм.

Таблица 2

№ п.п	P_{2i} , кВт	n_i , об/мин	M_i , Нм	I_{1i} , А	P_{1i} , кВт	$\eta_i, \%$	$\cos\varphi_i$
1	0						
2	0,25 P_H						
3	0,50 P_H						
4	0,75 P_H						
5	P_H						
6	1,25 P_H						

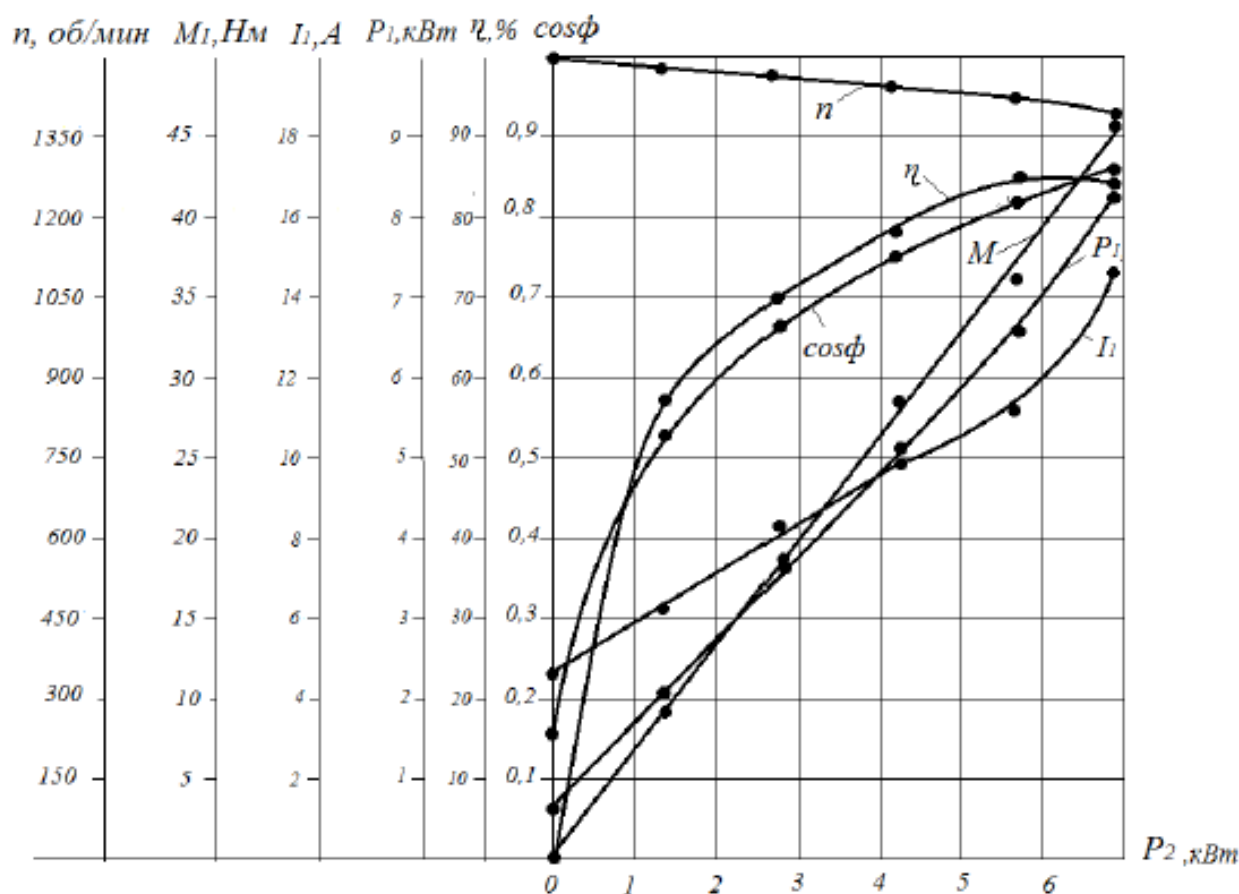


Рисунок 2. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Механическую характеристику асинхронного двигателя $n = f(M)$ строят с помощью круговой диаграммы следующим образом. Задаются значениями скольжения S_i % = 0; 2; 4; 6; 10; 20; 30; 50; 70; 100% и определяют соответствующие им точки на окружности токов круговой диаграммы, а также величины момента M_i . Частоту вращения ротора двигателя n_i находят из известного соотношения $n_i(1-S_i)$. Полученные данные заносят в таблицу 3 и по ним строят механическую характеристику двигателя с учетом максимального момента и критического скольжения.

Таблица 3

$S_i, \%$	0	2	4	6	10	20	30	60	70	100
$M_i, \text{Нм}$										
$n_i, \text{об/мин}$										

n , об/мин

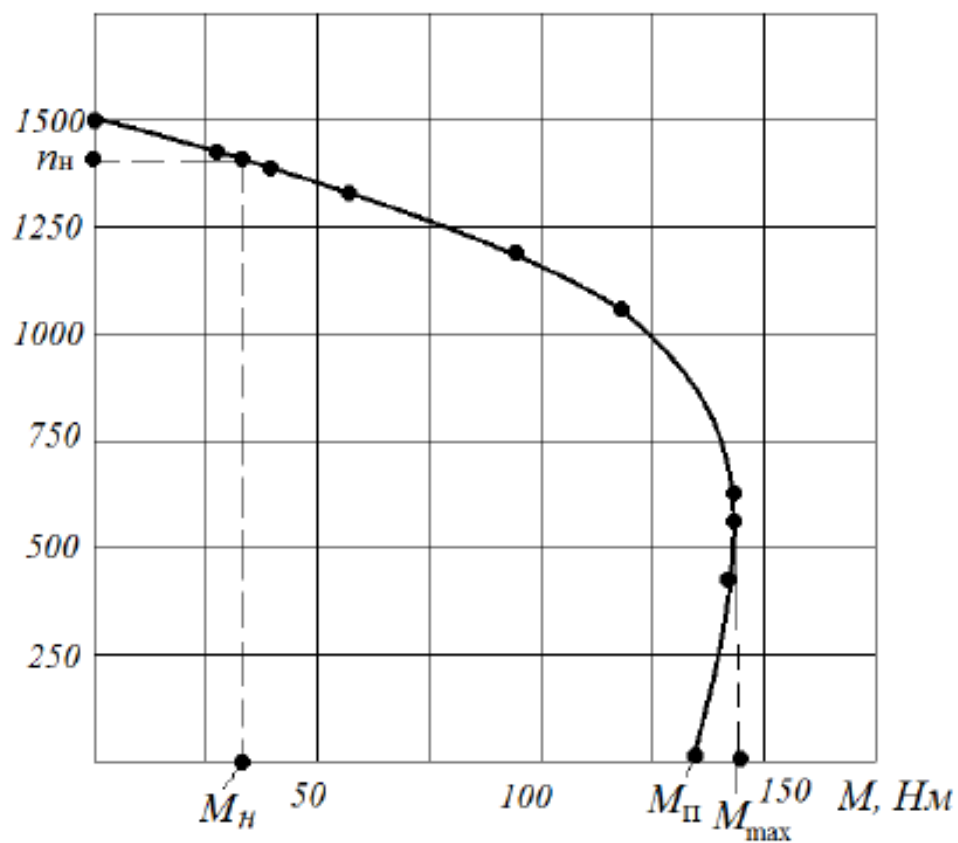


Рисунок 3. Механическая характеристика асинхронного двигателя

2. РАСЧЕТ СИНХРОННЫХ МАШИН

Трехфазный синхронный генератор включен в сеть и нагружен симметричной нагрузкой. Значения величин в относительных единицах (о. е.), характеризующих номинальный режим работы генератора, составляют напряжение на выводах обмотки статора $U_N=1$ о.е. и коэффициент мощности нагрузки $\cos\varphi_N$ (см. табл. 5). Кроме того, в таблице 5 заданы значения других величин в относительных единицах: активного R_a и индуктивного X_a сопротивлений обмотки статора магнитодвижущей силы (МДС) продольной реакции якоря F_0 при номинальном токе статора и заданном значении $\cos\varphi_N$ нагрузки. По условию также задана нормальная характеристика холостого хода генератора (табл. 4)

Нормальная характеристика холостого хода синхронного генератора

Таблица 4

I_b	0	0,5	1,0	1,5	2
E_o	0	0,5	1,0	1,2	1

Содержание задания

1. Начертить эскиз магнитной системы и построить векторную диаграмму Потье для режима номинальной нагрузки генератора. Определить по диаграмме Потье повышение напряжения при полном сбросе нагрузки генератора.

2. Построить с помощью векторной диаграммы Потье внешнюю $U=f(I)$ и регулировочную $I_b=f(I)$ характеристики синхронного генератора при заданном значении $\cos\varphi_N$.

Методические рекомендации

К пункту 1. На эскизе магнитной системы неявнополюсной синхронной машины необходимо изобразить статор (якорь), ротор (индуктор), обмотку возбуждения, контактные кольца, щетки и направление замыкания основного магнитного потока

Таблица 5

№ варианта параметры	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
R_a о.е.	0,03	0,05	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02	0,06
X_0 о.е.	0,11	0,14	0,12	0,13	0,10	0,09	0,11	0,13	0,12	0,14	0,11	0,09	0,10	0,13
F_a о.е.	0,72	0,83	0,68	0,70	0,85	0,75	0,82	0,73	0,83	0,74	0,84	0,75	0,85	0,76
$\text{Cos } \varphi_H$	0,82	0,9	0,85	0,8	0,74	0,8	0,82	0,84	0,9	0,7	0,88	0,84	0,8	0,87
№ варианта параметры	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
R_a о.е.	0,05	0,04	0,03	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,04	0,05	0,03	0,02	0,03	0,04
X_0 о.е.	0,11	0,14	0,12	0,11	0,13	0,10	0,09	0,12	0,10	0,12	0,13	0,10	0,11	0,12
F_a о.е.	0,86	0,77	0,87	0,78	0,88	0,68	0,90	0,69	0,91	0,70	0,90	0,72	0,75	0,78
$\text{Cos } \varphi_H$	0,8	0,9	0,75	0,85	0,79	0,82	0,80	0,79	0,86	0,81	0,91	0,8	0,9	0,7
№ варианта параметры	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
R_a о.е.	0,05	0,02	0,03	0,04	0,05	0,02	0,03	0,04	0,05	0,02	0,03	0,04	0,05	0,02
X_0 о.е.	0,13	0,14	0,15	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14
F_a о.е.	0,81	0,65	0,68	0,71	0,74	0,77	0,80	0,67	0,67	0,73	0,76	0,79	0,82	0,69
$\text{Cos } \varphi_H$	0,8	0,9	0,7	0,8	0,75	0,8	0,85	0,9	0,85	0,75	0,70	0,9	0,8	0,7
№ варианта параметры	43	44	45	46	47	48	49	50	43	44	45	46	47	48
R_a о.е.	0,03	0,04	0,05	0,02	0,03	0,04	0,05	0,04	0,03	0,04	0,05	0,02	0,03	0,04
X_0 о.е.	0,15	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,10	0,11	0,15	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14
F_a о.е.	0,72	0,75	0,78	0,70	0,72	0,75	0,78	0,81	0,72	0,75	0,78	0,70	0,72	0,75
$\text{Cos } \varphi_H$	0,8	0,75	0,8	0,9	0,8	0,9	0,85	0,8	0,8	0,75	0,8	0,9	0,8	0,9

Векторная диаграмма электромагнитодвижущих сил синхронного генератора (диаграмма Потье) строится для определения тока возбуждения (МДС индуктора) в относительных единицах, необходимого для обеспечения номинального режима работы при $U_H=1$ о.е., $I_H=1$ о.е. и заданном значении $\text{cos}\varphi_H$ (табл. 5.), а также для определения напряжения генератора при полном сбросе нагрузки. Диаграмму Потье строят в относительных единицах для одной фазы генератора.

Порядок построения

1. В правой части листа миллиметровой бумаги размером 220x175 мм строят нормальную характеристику холостого хода генератора $E = f(I_B)$ по данным таблицы 9, как показано на рис. 2.3. При этом целесообразно принять масштаб для тока возбуждения I_B и МДС индуктора F_B 50 мм в 1 о.е. и для напряжения U_H 100 мм в 1 о.е. При построении следует учитывать, что значение величин тока возбуждения генератора и МДС индуктора в относительных единицах одинаковы, поскольку

$$F_B = \frac{F_{B1}}{F_{B0}} = \frac{W_B I_{B1}}{W_B I_{B0}} = \frac{I_{B1}}{I_{B0}} = I_B(\text{о.е.})$$

где F_{B1} и F_{B0} — значение величины МДС индуктора соответственно при текущем значении тока возбуждения I_{B1} и нормальном токе возбуждения I_{B0} , то есть при токе возбуждения, обуславливающем на зажимах генератора номинальное напряжение в режиме холостого хода;

W_B - число витков обмотки возбуждения индуктора.

2. Слева от характеристики холостого хода на одинаковом уровне с ЭДС и в том же масштабе проводят параллельно оси ординат вектор напряжения $U_H=1$ о. е.

Под фазовым углом $\varphi_n = \arccos \varphi_n$ в сторону отставания от вектора U_H намечают направление вектора тока \dot{I}_H (при построениях нужно знать лишь направление этого тока, поэтому сам вектор \dot{I}_H не строят). В направлении вектора тока \dot{I}_H строят вектор продольной МДС реакции якоря F_a в одинаковом масштабе с МДС индуктора F_B и тока возбуждения \dot{I}_H .

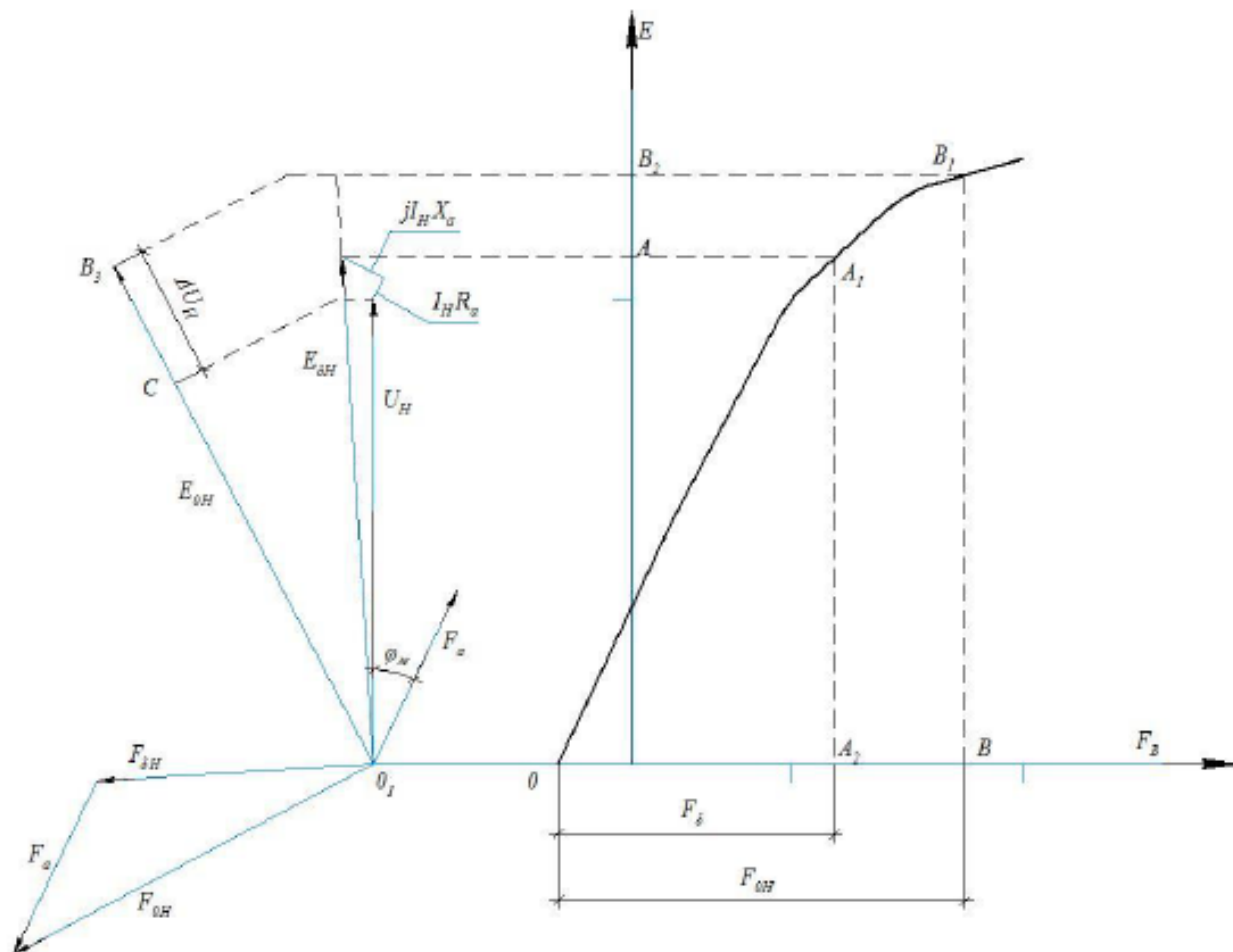


Рисунок 2 – Векторная диаграмма Потье синхронного генератора при номинальной нагрузке

К вектору напряжения \dot{U}_H прибавляют векторы падения напряжения на активном и индуктивном сопротивлениях обмотки статора согласно уравнению

$$U_H + \dot{I}_H R_a + j \dot{I}_H X_\sigma = E_{\delta H}$$

в котором $\dot{I}_H R_a$ совпадает с направлением тока, а $\dot{I}_H X_\sigma$ опережает вектор тока на 90° . Полученная величина $E_{\delta H}$ является той ЭДС, которая наводится в обмотках статора результирующим магнитным потоком, создаваемым совместным действием двух МДС - МДС индуктора $F_{\delta H}$ и МДС реакции якоря $F_{\delta a}$, то есть результирующей МДС генератора $F_{\delta H}$. Это соответствует закону магнитного равновесия генератора.

$$F_{\delta H} = F_{\delta H} + F_{\delta a}$$

1. По найденной величине ЭДС $F_{\delta H}$, используя нормальную характеристику холостого хода, определяют значение результирующей МДС гене-

ратора $F_{\text{бн}}$ в относительных единицах. Для этого величину $E_{\text{бн}}$ откладывают по оси ординат характеристики холостого хода (точка А). Затем от точки А проводят линию параллельно оси абсцисс до встречи с характеристикой холостого хода в точке A_1 . Проецируя точку A_1 на ось абсцисс, получают точку A_2 . Отрезок OA_2 равен искомой величине $F_{\text{бн}}$ в относительных единицах.

Вектор результирующей МДС $F_{\text{бн}}$ генератора опережает вектор обуславливаемой им ЭДС $E_{\text{бн}}$ на угол 90° , его строят в левой части диаграммы.

4. Находят величину МДС обмотки возбуждения $F_{\text{он}}$ на основе уравнения

$$F_{\text{он}} = F_{\text{бн}} + (-F_a)$$

Для получения МДС $F_{\text{он}}$ следует вектор МДС F_a с обратным знаком построить с конца вектора $F_{\text{бн}}$. Найденная величина МДС индуктора $F_{\text{он}}$ в относительных единицах равна номинальному току возбуждения $I_{\text{вн}}$, необходимому для поддержания режима работы синхронного генератора при заданном значении $\cos \varphi_n$.

5. Определяют величину ЭДС обмотки статора генератора в режиме холостого хода $E_{\text{он}}$ при номинальном токе возбуждения $I_{\text{вн}}$, равном в относительных единицах величине МДС индуктора $F_{\text{он}}$. Для этого по оси абсцисс характеристики холостого хода откладывают значение величины $I_{\text{вн}}$ равной в относительных единицах $F_{\text{он}}$ и получают прямую линию параллельно оси ординат до встречи с характеристикой холостого хода в точке B_1 . Спроецировав точку B_1 на ось ординат, получают точку B_2 и одинаковые отрезки BB_1 и OB_2 , которые равны искомой величине ЭДС $E_{\text{он}}$ в относительных единицах.

В левой части диаграммы строят вектор ЭДС $E_{\text{он}}$ как отстающий от вектора МДС $F_{\text{он}}$ на угол 90° .

Повышение напряжения на зажимах генератора $\Delta U_{\text{н}}$ при полном сбросе нагрузки и неизменном номинальном значении тока возбуждения определяют на основе построенной векторной диаграммы (рис. 2). Для этого на векторе ЭДС $E_{\text{он}}$ откладывают величину номинального напряжения $U_{\text{н}} = 1$ о. е. и получают точку С. Полученный таким образом отрезок BC равен искомой величине $\Delta U_{\text{н}}$ в относительных единицах. Повышение напряжения генератора в процен-

тах ΔU_H % оценивается из соотношения $\Delta U_H \% = (E_{оН} - 1)100\%$

К пункту 2. Внешнюю характеристику синхронного генератора $U=f(I)$ при неизменных оборотах ротора n_n , токе возбуждения $I_{вН}$ и характере нагрузки $\cos\phi_n$ строят в относительных единицах по трем точкам. Координаты двух точек определяют с помощью построенной диаграммы Потье (рис. 3). Первая точка соответствует номинальной нагрузке генератора ($I_n = 1$ о.е.; $U_n = 1$ о.е.); вторая - режиму при полном сбросе нагрузки ($I = 0$; $U = E_{оН}$ о.е.). Третью точку для построения внешней характеристики генератора получают на основе векторной диаграммы Потье, предварительно построенной при токе нагрузки $I = 0,5$ $I_n = 0,5$ о.е. (рис. 4). Координаты искомой точки будут ($I = 0,5 I_n = 0,5$ о.е.; $U = E_{0(0,5)}$ о.е.).

Внешнюю характеристику генератора строят на листе миллиметровой бумаги размером 120X150 мм (рис. 5).

Регулировочную характеристику синхронного генератора $I_b = f(I)$ при неизменных значениях частоты вращения ротора n_n , напряжении $U_n=1$ о.е. и характере нагрузки $\cos\phi_n$ строят в относительных единицах по трем точкам при значениях тока нагрузки $I=0;0,5;1$ о.е. Значения величин тока возбуждения в относительных единицах определяют по характеристике холостого хода с использованием соответствующих им значений ЭДС: $E_{оН}$, $E_{0(0,5)}$ и $E_a=U_n=1$ о.е. Значения величин этих ЭДС оценивают из диаграммы Потье (рис. 3 и 4).

Регулировочную характеристику генератора строят на листе миллиметровой бумаги размером 120x150 мм (рис. 5) по точкам с координатами ($I = 0$; $I_b=1$ о.е.); ($I = 0,5$ о.е., $I_b(0,5)$); ($I=1$ о.е., $I_b = I_{вН}$).

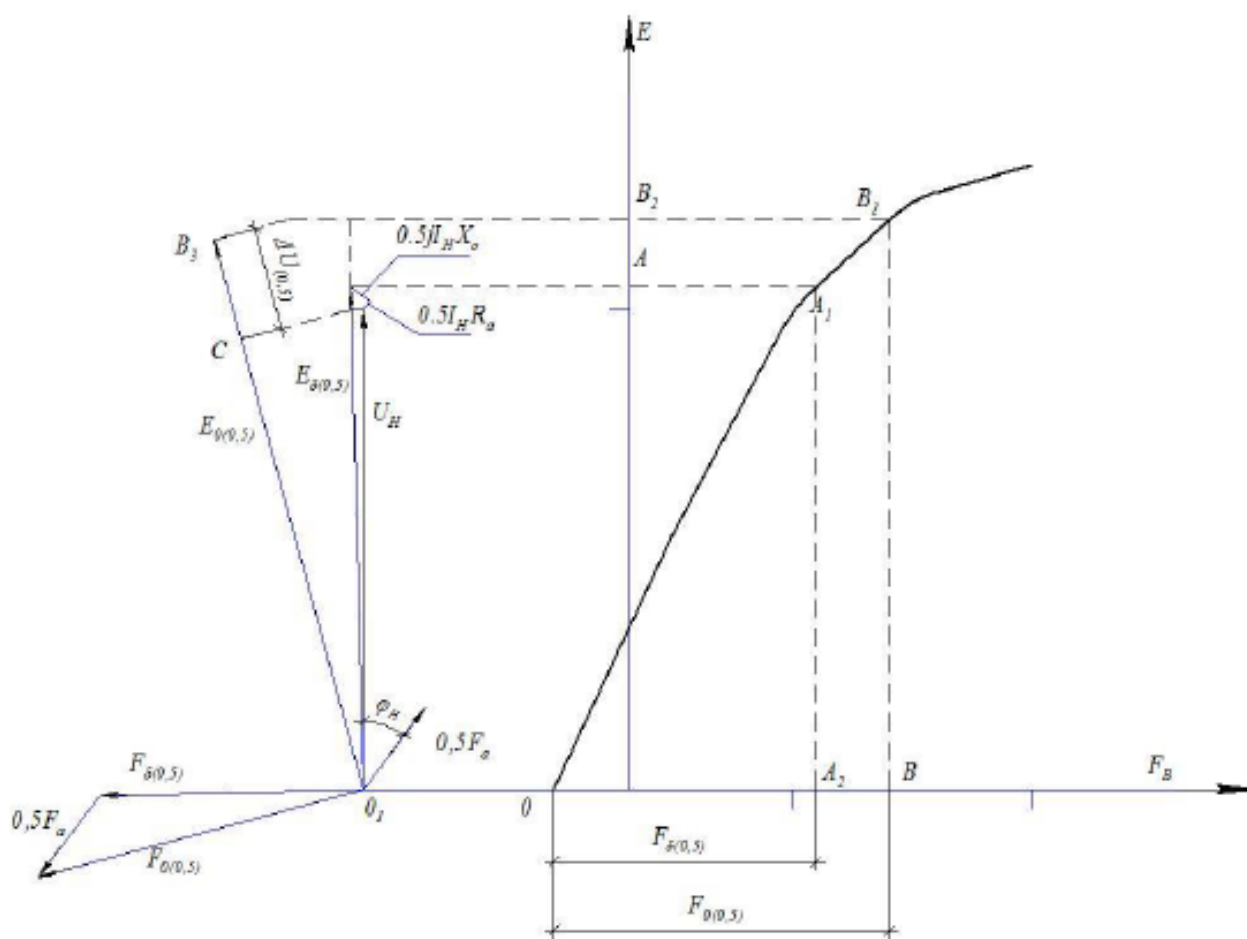


Рис. 3 Векторная диаграмма Потье синхронного генератора при $I=0,5I_n$

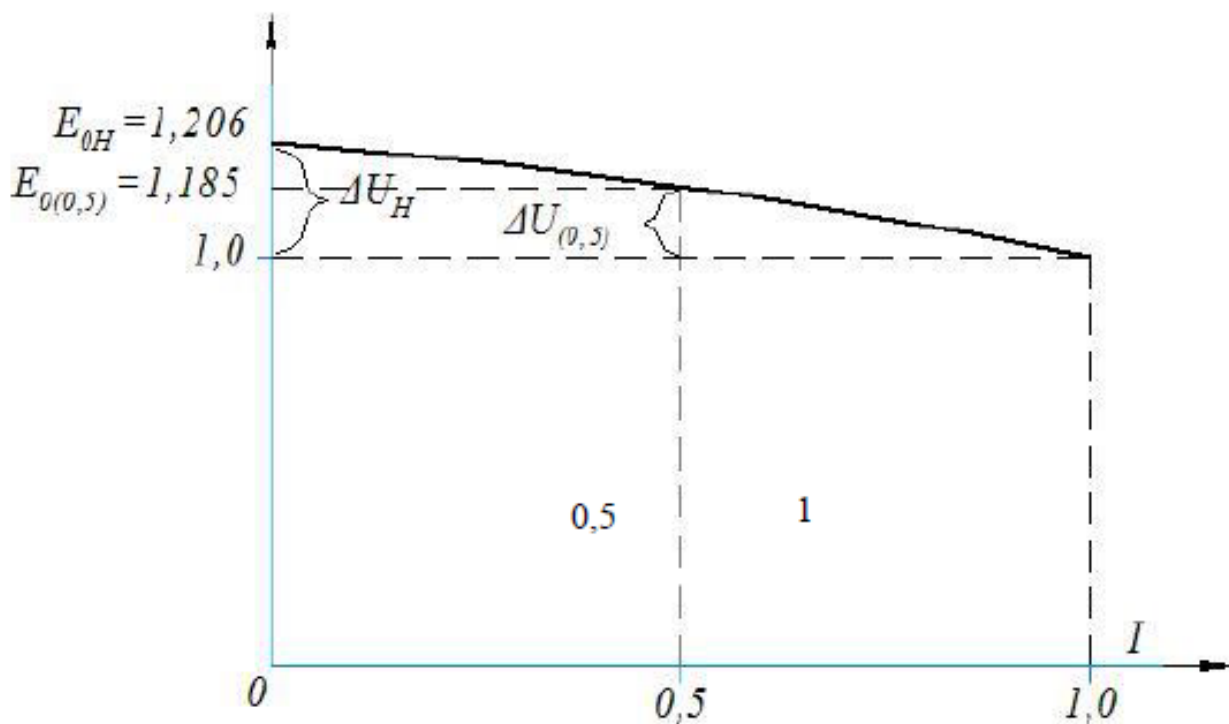


Рис. 4 Внешняя характеристика синхронного генератора

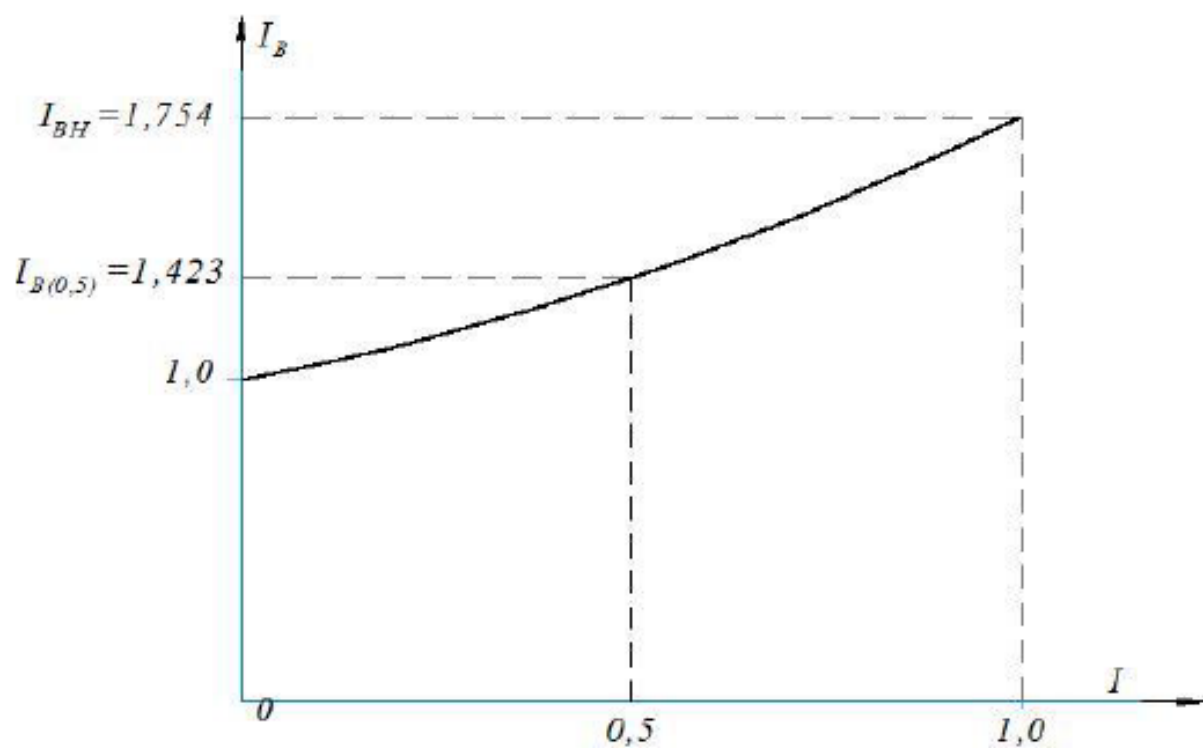


Рис. 5 Регулировочная характеристика синхронного генератора

ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ УЧЕБНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Основная литература:

1. Электрические машины [Электронный ресурс] / А. П. Епифанов, Г. А. Епифанов. - 1-е изд. - : Лань, 2017. - 300 с. - Режим доступа:<https://e.lanbook.com/book/95139>.

2. Электрические машины и трансформаторы [Электронный ресурс] : учебное пособие / В. М. Игнатович, Ш. С. Ройз. - 6-е изд. - Томск : ТПУ, 2013. - 182 с. - Режим доступа:<http://e.lanbook.com/books/element.php?>

3. Электрические машины: задачи для практических занятий [Электронный ресурс]: учебное пособие по дисциплине «электрические машины», для направления подготовки «электроэнергетика и электротехника», профиль «электрообеспечение» всех форм обучения. - Орел : ОрелГАУ, 2014. - 17 с. - Режим доступа:<http://e.lanbook.com/books/element.php?>

4. Электрические машины [Электронный ресурс] : учебное пособие / А. Л. Встовский. - Красноярск: СФУ, 2013. - 464 с. - Режим доступа:<http://e.lanbook.com/books/element.php?>

5. Расчет асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором [Электронный ресурс] : учебное пособие / В. Д. Авилов, Л. Е. Серкова. - 3-е изд., с измен. - Омск : ОмГУПС, 2014. - 94 с. - Режим доступа:<https://e.lanbook.com/book/129466>

6. Электрические машины : задачник [Электронный ресурс] / А. А. Ионов. - Самара : СамГУПС, 2019. - 115 с. - Режим доступа:<https://e.lanbook.com/book/145823>

Дополнительная литература:

1. Дискретно-полевые модели электрических машин. Ч. I, II [Электронный ресурс] : учебное пособие / Е. Ф. Беляев, Н. В. Шулаков. - Пермь : ПНИПУ, 2009. - 457 с. <https://e.lanbook.com/book/160825>

2. Электрические машины. Машины постоянного и переменного тока [Электронный ресурс] : конспект лекций / А. А. Ионов. - Самара : СамГУПС, 2017. - 183 с. - Режим доступа:<https://e.lanbook.com/book/130306>

3. Электрические машины. Двигатель постоянного тока. Курсовое проектирование: Учебное пособие [Электронный ресурс] / И. Б. Битюцкий. - Москва : Лань, 2018. - Режим доступа:<https://e.lanbook.com/book/99215>.

4. Электрические машины. Асинхронные машины [Электронный ресурс] : учебное пособие для студентов направления подготовки 35.03.06 «агроинженерия». - Саратов : Саратовский ГАУ, 2018. - 123 с. - Режим доступа:<https://e.lanbook.com/book/137487>

5. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины и микромашины. - М.: Высшая школа, 2001.

Кацман М.М. Электрические машины. - М.: Высш. шк., 2000.- 463с.